

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 22, выпуск 4, 2025

ISSN (Print) 1815-588X
ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель

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

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью
«Издательский Центр РИОР» по договору
№ ЭА78751 от 28.12.2024

Адрес учредителя и редакции

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 457-81-14; e-mail: brni@pgups.ru

Адрес издателя

127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, офис 402

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005, выдано
Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия, Управление
по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий
(решение Президиума Высшей аттестационной
комиссии Минобрнауки России от 19.02.2010, № 6/6)

Журнал публикует научные статьи в области технических
наук (транспорт, телекоммуникации, строительство)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Урал-Пресс» 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Валинский Олег Сергеевич, главный редактор,
канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург,
Россия

Курилкин Дмитрий Николаевич, заместитель главного
редактора, канд. техн. наук, доц., ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Евстафьев Андрей Михайлович, научный редактор,
д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Абу-Хасан Махмуд Самиевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Анисимов Владимир Александрович, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Багери Мортеза, профессор, Иранский университет науки
и технологии, Тегеран, Иран

Беленцов Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Блажко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Воробьев Александр Алфеевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Голоскоков Дмитрий Петрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Казанская Лилия Фаатовна, д-р техн. наук, доц., ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Кононов Дмитрий Павлович, д-р техн. наук, доц., ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Копытенкова Ольга Ивановна, д-р мед. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Леванчук Александр Владимирович, д-р мед. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Макарова Елена Игоревна, д-р техн. наук, доц., ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Новичихин Алексей Викторович, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Парамонов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Привалов Андрей Андреевич, д-р воен. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Рахимов Рустам Вячеславович, д-р техн. наук, профессор,
Ташкентский государственный транспортный университет,
Ташкент, Республика Узбекистан

Смирнов Владимир Игоревич, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Смирнов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Соловьева Валентина Яковлевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Талантова Клара Васильевна, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Терехов Лев Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Уздин Александр Моисеевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Хамидов Отабек Рустамович, д-р техн. наук, профессор,
Ташкентский государственный транспортный университет,
Ташкент, Республика Узбекистан

Черников Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Шевлюгин Максим Валерьевич, д-р техн. наук, доц.,
РУТ (МИИТ), Москва, Россия

Шершнева Мария Владимировна, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

Фото на обложке предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС

Подписано в печать 25.11.2025. **Выход в свет** 17.12.2025.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 35.

Тираж 200 экз. Заказ 4430. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «БУКИ ВЕДИ»,

г. Москва, Партийный пер., 1, корп. 58, стр. 3

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2025

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 22, issue 4, 2025

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company

"Publishing Center RIOR" under contract

N ЭА78751 dated December 28, 2024

Founder's and editorial office address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,

(812) 457-81-14, e-mail: brni@pgups.ru

Publisher's address

127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402

Mass media registration certificate number

ПН N ФС2-7499 dd. 06.04.2005

issued by the Federal service for the monitoring
of legislation compliance in the sphere of mass
communications and the preservation of cultural heritage,
North West Federal district division

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

The journal is included in the List of leading
peer-reviewed scientific journals and publications

The journal publishes scientific articles in the fields
of Technics (transport, telecommunications, construction)

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Ural-Press" 33315

JOURNAL STAFF

Oleg Valinskiy, Editor-in-chief, PhD Eng. Sci.,
Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University, St. Petersburg, Russia

Dmitriy Kurilkin, Deputy Editor-in-chief, PhD Eng. Sci., Associate
Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University, St. Petersburg, Russia

Andrey Evstafev, Science editor, D. Eng. Sci., Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

EDITORIAL TEAM

Makhmud Abu-Khasan, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Vladimir Anisimov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Morteza Bagheri, PhD, Associate Professor, Iran University
of Science and Technology, Teheran, Iran

Yuriy Belentsov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Lyudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Alexander Vorobyev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Dmitriy Goloskokov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanaev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Liliya Kazanskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Dmitriy Kononov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Olga Kopytenkova, D. Med. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Alexander Levanchuk, D. Med. Sci., Professor, Emperor Alexander
I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Alexander Ledyayev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Elena Makarova, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Alexander Nikitin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Aleksey Novichikhin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Vladimir Paramonov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Andrey Privalov, D. Mil. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Rustam Rakhimov, D. Eng. Sci., Professor, Tashkent
State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Vladimir I. Smirnov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Vladimir N. Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valentina Soloveva, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Lev Terekhov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St.
Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Alexander Uzdin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Otabek Khamidov, D. Eng. Sci., Professor, Tashkent State
Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Nikolay Chernikov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Maksim Shevlyugin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian
University of Transport, Moscow, Russia

Maria Shershneva, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valeriy Shtykov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

© Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

П. К. Рыбин, М. А. Дроздова, А. В. Бенин

Образовательная политика ПГУПС в рамках программы «Приоритет-2030»: перспективы развития, лучшие практики и вклад в инженерное образование 845

А. В. Романов, Ю. П. Бороненко, А. А. Киселев, М. В. Зимакова

Ударное воздействие от колес подвижного состава, имеющих изолированные неровности 856

А. В. Качалкин, А. Ф. Колос

Определение интенсивности накопления остаточных деформаций в балластной призме железнодорожного пути в зависимости от степени загрязнения щебеночного балласта угольной пылью 869

В. Ф. Танаев

Анализ эффективности использования тормозных средств тепловозов в эксплуатации 880

Е. В. Пакулина

Моделирование логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ 895

А. П. Ледяев, А. Н. Коньков, А. А. Сокорнов

Математическое моделирование односводчатой станции метрополитена в объемной постановке 906

М. Х. Вахидов, О. Р. Хамидов, Ш. Ш. Акбарова

Применение нейронной сети для диагностики дефектов ротора асинхронного тягового электродвигателя на основе параметров магнитной индукции 916

А. В. Романов, А. А. Киселев

К вопросу о законе распределения динамической силы воздействия колеса на рельс 926

И. Г. Киселев, В. В. Галов, М. Ю. Кудрин, Д. Я. Монастырский

Определение температурных полей различных грузов при перевозке в автономных рефрижераторных контейнерах с использованием холода сжиженного природного газа 938

В. Н. Кавказский, Е. А. Ермонин, Л. А. Андреева

Анализ аварийных ситуаций при сооружении автодорожных тоннелей горным способом в инженерно-геологических условиях г. Сочи 947

А. Ю. Сулимин, М. А. Иванов

Несовершенства расчетных моделей электроэнергии и мощности на тягу поездов в программном пакете КОРТЭС 958

М. А. Шрайбер

Диагностика изоляции тяговых электродвигателей по интенсивности частичных разрядов 967

Б. И. Ходак, В. П. Бельтюков

Анализ факторов, влияющих на точность результатов метода определения температурных напряжений плетей бесстыкового пути при помощи частот собственных колебаний 975

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

П. А. Кравченко, В. М. Полуниин, А. Н. Макаров

Опыт применения методов математического моделирования
при обследовании существующего котлована 984

А. А. Сокорнов, Я. В. Мельник, А. П. Ледяев, А. В. Пинчук

Математическое моделирование системы «вода — грунтовый массив — опускная секция» 999

Р. А. Авхимович, С. В. Чижов

Анализ напряженного состояния узла объединения стойки и пролетного строения
рамного железобетонного моста в условиях деформаций ползучести и усадки..... 1013

В. В. Веселов

Инновационные конструкции каркасов промышленных зданий 1025

Т. Л. Риполь-Сарагоси, Д. А. Мальцев

Исследование факторов влияния на срок службы силикагелей..... 1035

Н. И. Иост, О. К. Суворова

Предотвращение производственного травматизма на объектах ОАО «РЖД» 1045

А. В. Харламова, Е. И. Верех-Белоусова

Приоритетные направления переработки отвальной породы угольных шахт
для получения редких металлов..... 1053

Д. А. Черепанова

Наследственность показателей качества бетона как фактор эффективного контроля..... 1060

А. А. Антонюк, А. А. Белый, Ш. Ш. Кадилова, А. А. Махонько

Обоснование возможности и перспектив применения технологии электрохимической
защиты от коррозии арматуры, расположенной в теле опор мостовых сооружений 1073

Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис

Учет теплопроводности инъекционных растворов при их комбинировании
с охлаждающими устройствами в основании земляного полотна..... 1085

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

К. С. Простакевич, А. Л. Абрамова, А. И. Честнов, И. А. Сикарев, В. М. Абрамов

Совершенствование телекоммуникационных подсистем для управления безопасностью
применения автономных и полуавтономных коммерческих судов..... 1096

А. Т. Попов, О. А. Сулова, М. А. Чехов, А. И. Малахов

Комплексная система безопасности на железной дороге с применением FPV-дронов..... 1106

CONTENTS

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

P. K. Rybin, M. A. Drozdova, A. V. Benin

The Educational Policy of SPTU within the Framework of the Priority-2030 Programme:
Prospects for Development, Best Practices, and Contribution to Engineering Education 853

A. V. Romanov, Yu. P. Boronenko, A. A. Kiselev, M. V. Zimakova

Wheel-Generated Impact Forces from Railway Rolling Stock with Isolated Irregularities 867

A. V. Kachalkin, A. F. Kolos

Determining the Degree of Residual Deformation Accumulation
in the Ballast Prism of a Railway Track by Analysing the Intensity
of Ballast Gravel Contamination with Coal Dust 878

V. F. Tanaev

Analysis of the Efficiency of Diesel Locomotive Brake Equipment 893

E. V. Pakulina

Modelling a Rail Supply Chain for Railway Track Maintenance 904

A. P. Ledyaev, A. N. Konkov, A. A. Sokornov

Three-Dimensional Mathematical Model of a Single-Vault Metro Station 914

M. Kh. Vakhidov, O. R. Khamidov, Sh. Sh. Akbarova

Artificial Neural Network for Rotor Fault Diagnosis in an Asynchronous
Traction Motor Using Magnetic Induction Parameters 924

A. V. Romanov, A. A. Kiselev

On the Distribution Law of Dynamic Wheel-Rail Interaction Force 936

I. G. Kiselev, V. V. Galov, M. Yu. Kudrin, D. Ya. Monastyrsky

Determining Temperature Fields of Various Cargo Transported in Autonomous
Refrigerated Containers Using Liquefied Natural Gas (LNG) Cooling 945

V. N. Kavkazsky, E. A. Ermonin, L. A. Andreeva

Analysis of Emergency Situations During the Construction of Road Tunnels
by Mining Methods in the Engineering-Geological Conditions of the Town of Sochi 956

A. Yu. Sulimin, M. A. Ivanov

Limitations of Calculation Models for Electricity Consumption
and Traction Power for Trains Within the KORTES Software Package 965

M. A. Shrayber

Diagnostics of Traction Motor Insulation by Partial Discharge Measuring Method 973

B. I. Khodak, V. P. Beltiukov

Analysis of factors influencing the accuracy of the results of the method
for Analysis of Factors Influencing the Accuracy of Thermal Stress Measurement
in Continuous Welded Rails Using Natural Oscillation Frequencies 982

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

P. A. Kravchenko, V. M. Polunin, A. N. Makarov	
The Application of Mathematical Modelling in the Survey of an Existing Excavation Pit.....	997
A. A. Sokornov, I. V. Melnik, A. P. Ledyayev, A. V. Pinchuk	
Mathematical Modelling of the «Water – Ground Mass – Immersed Section» System.....	1011
R. A. Avkhimovich, S. V. Chizhov	
Stress Assessment of the Column-Superstructure Joint in a Reinforced Concrete Frame Bridge Under Creep and Shrinkage Deformations	1023
V. V. Veselov	
Innovative Designs of Industrial Building Frames	1032
T. L. Ripol-Saragosi, D. A. Maltsev	
Assessment of the Factors Affecting the Service Lifespan of Silica Gel	1043
N. I. Iost, O. K. Suvorova	
Prevention of Non-Occupational Injuries at the Russian Railways JSC	1051
A. V. Kharlamova, E. I. Verekh-Belousova	
Key Technologies for Treating Coal-Mining Wastes And Extracting Rare Earth Metals.	1058
D. A. Cherepanova	
The Heredity of Concrete Quality Indicators As an Effective Control Factor	1070
A. A. Antonuk, A. A. Belyi, Sh. Sh. Kadirova, A. A. Makhonko	
Feasibility and Prospects of Applying Electrolytic Protection Against Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Supports	1082
D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin, A. L. Lanis	
Considering Thermal Conductivity of Injection Solutions in Combination with Cooling Systems Within the Railway Formation Foundation	1094

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

K. S. Prostakevich, A. L. Abramova, A. I. Chestnov, I. A. Sikarev, V. M. Abramov	
Potential for Improving Telecommunication Subsystems to Enhance Safety Management in Autonomous and Semi-Autonomous Commercial Vessels	1103
A. T. Popov, O. A. Suslova, M. A. Chekhov, A. I. Malakhov	
Integrated Railway Safety System Using FPV Drones.....	1116



УДК 372.862

Образовательная политика ПГУПС в рамках программы «Приоритет-2030»: перспективы развития, лучшие практики и вклад в инженерное образование

П. К. Рыбин, М. А. Дроздова, А. В. Бенин

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

Для цитирования: Рыбин П. К., Дроздова М. А., Бенин А. В. Образовательная политика ПГУПС в рамках программы «Приоритет-2030»: перспективы развития, лучшие практики и вклад в инженерное образование // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 845–855. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-845-855

Аннотация

Цель: Проанализировать образовательную политику ПГУПС в рамках программы «Приоритет-2030», выявить лучшие практики и достижения, рассмотреть перспективы развития, а также оценить вклад университета в развитие инженерного образования в России. **Методы:** Включали анализ стратегических документов ПГУПС и Транспортной стратегии РФ, метод кейс-стади (на примере защиты дипломных проектов на Горьковской железной дороге), сравнительно-сопоставительный анализ традиционной и новой моделей подготовки, а также анализ количественных данных (трудоустройство выпускников, масштабы внедрения цифровых программ). **Результаты:** Показали, что ключевым достижением стало успешное внедрение формата кросс-функциональных инженерных команд для выполнения выпускных квалификационных работ по заказу промышленных партнеров (кейс «Яранск — Котельнич»). Это способствовало формированию эффективного «исследовательского моста» по схеме запрос индустрии → образование и наука → внедрение. **Практическая значимость:** Заключается в том, что представленная модель трансформации ПГУПС в «Университет 4.0», интегрированная в отраслевую экосистему, служит эффективным примером для других вузов. Опыт формирования кросс-функциональных команд и интеграции образования с реальными проектами промышленных партнеров может быть масштабирован и адаптирован, что вносит прямой вклад в обеспечение кадровых потребностей транспортной отрасли и достижение целей национальных стратегий. Такой формат способствует решению задачи по укреплению технологического суверенитета и конкурентоспособности России.

Ключевые слова: «Приоритет-2030», образовательная политика вуза, транспортное образование, инженерное образование.

Введение

Современные вызовы в сфере инженерного образования требуют внедрения системных изменений в образовательный процесс, ориентированных на цифровизацию, междисциплинарность и практико-ориентированные методы подготовки кадров для обеспечения технологического лидер-

ства России [1]. Федеральная программа «Приоритет-2030» стала драйвером таких изменений в ведущих университетах России [2].

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС) — старейший транспортный вуз страны, основанный в 1809 г. Сегодня универси-

тет объединяет более 11 тысяч обучающихся по программам высшего образования, 7 факультетов и 15 филиалов. ПГУПС традиционно является флагманом подготовки специалистов для железнодорожного транспорта, транспортного и гражданского строительства, в том числе для ОАО «РЖД» [3].

Методология

При проведении исследования авторами был применен комплекс методов, направленных на всесторонний анализ образовательной политики ПГУПС в процессе реализации программы «Приоритет-2030». Так, при проведении анализа документов ПГУПС были исследованы стратегические документы университета, отчеты по реализации программы «Приоритет-2030», а также Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом до 2035 г. Это позволило выявить ключевые приоритеты, целевые показатели и зафиксировать вектор развития образовательной политики вуза. Авторами был применен метод кейс-стади. Так, в качестве ключевого объекта для углубленного анализа был выбран флагманский проект ПГУПС — практика формирования кросс-функциональных инженерных команд для выполнения выпускных квалификационных работ (ВКР) по заказу промышленных партнеров. В процессе изучения материала был детально изучен кейс защиты дипломных проектов на Горьковской железной дороге (2024/25 учебный год), включая организационную структуру, используемые цифровые платформы («ВКР-проект») и полученные результаты.

Также авторы использовали метод сравнительно-сопоставительного анализа, сравнивая традиционную модель инженерной подготовки с новой моделью, внедряемой в ПГУПС, по таким параметрам, как практико-ориентированность, развитие мягких навыков (soft skills), интеграция с индустрией и уровень междисциплинарности [4].

Для оценки эффективности образовательной политики был проведен анализ количественных данных, при котором были использованы официальные статистические показатели университета, в первую очередь — уровень трудоустройства выпускников (98,5 %), а также данные о масштабах внедрения новых практик (например, количество студентов, прошедших обучение на цифровой кафедре).

Таким образом, методологическая основа исследования сочетает качественные и количественные методы, что обеспечивает релевантность, достоверность и обоснованность выводов.

Результаты

Стратегические приоритеты образовательной политики ПГУПС

С 2021 г. ПГУПС вошел в число участников федеральной программы «Приоритет-2030». Университетом определены следующие ключевые направления развития:

- реализация стратегических проектов, связанных с развитием инновационных железнодорожных технологий, внедрением новых технологий и материалов в строительстве, цифровизацией транспортной отрасли, устойчивым развитием отрасли;
- расширение академической мобильности, развитие сетевых магистратур и образовательных альянсов;
- интеграция науки, образования и индустрии для подготовки инженеров будущего;
- развитие кадров для проектов высокоскоростных магистралей (ВСМ), транспортной инфраструктуры и цифровых экосистем.

Одним из ключевых принципов образовательной политики ПГУПС является ее многовекторность: помимо профессиональных навыков обучающиеся получают цифровые, мягкие и предпринимательские навыки, а также имеют возможность получения второй квалификации.

Таким образом, стратегический приоритет ПГУПС — подготовка специалистов, способных работать на стыке традиционной инженерии, цифровых технологий и междисциплинарных проектов. Современное развитие транспортной отрасли характеризуется высокой степенью технологической сложности и интеграции различных сфер: инжиниринга, цифровых решений, логистики, экологии, управления и сервиса. Для обеспечения устойчивого развития и повышения конкурентоспособности транспортных систем необходимы специалисты нового типа — это инженеры, сочетающие компетенции классического инжиниринга и IT-сферы, с развитым кросс-дисциплинарным мышлением.

Значимость такой подготовки заключается в нескольких аспектах. Во-первых, транспортные проекты становятся все более комплексными: проектирование и строительство высокоскоростных магистралей, внедрение интеллектуальных транспортных систем, цифровых двойников, автоматизированного управления движением требуют объединения знаний в области классической инженерии и современных цифровых платформ. Во-вторых, глобальная конкуренция смещается в сторону инноваций и гибкости — выигрывают команды, которые способны не только проектировать инфраструктуру, но и интегрировать в нее цифровые решения для управления потоками, безопасности и устойчивости. В-третьих, отрасль остро нуждается в специалистах, способных вести коммуникацию между инженерами, программистами, экономистами и управленцами, то есть выступать «связующим звеном» междисциплинарных проектов.

Преимущества такой подготовки очевидны:

- высокая востребованность на рынке труда. Компании транспортного сектора заинтересованы в кадрах, готовых решать задачи «сквозной цифровизации» отрасли;
- гибкость и адаптивность специалистов. Они могут быстро переключаться между инженерными, управленческими и цифровыми задачами;

- повышение инновационного потенциала. Инженеры нового типа способны не только использовать готовые технологии, но и инициировать разработку и внедрение новых решений;

- формирование готовых к работе проектных команд. Объединение компетенций разных профилей создает условия для быстрой реализации комплексных проектов.

Эта логика напрямую связана с переходом вузов к модели «Университет 4.0». Если Университет 1.0 — это центр подготовки кадров, 2.0 — учебно-научный комплекс, 3.0 — университет как исследовательский и инновационный центр, то Университет 4.0 представляет собой экосистему, интегрированную с индустрией, цифровыми платформами и глобальными сетями знаний. Подготовка междисциплинарных специалистов — ключевой элемент этой трансформации. В транспортной отрасли Университет 4.0 означает не только обучение и науку, но и прямое участие в реализации инфраструктурных мегапроектов, проектировании цифровых транспортных экосистем, формировании команд для международных и межотраслевых проектов.

Таким образом, переход к подготовке специалистов на стыке инженерии, цифровых технологий и междисциплинарных проектов — это не только ответ на запрос рынка труда, но и стратегический шаг к формированию Университета 4.0, где образование, наука и индустрия объединяются в единую систему создания знаний и технологий для будущего транспорта.

Новые подходы и методы образовательной политики

В рамках «Приоритет-2030» ПГУПС внедрил ряд новых образовательных практик:

1. Сетевая магистратура. Разнообразные совместные программы с вузами России и стран СНГ позволяют студентам осваивать междисциплинарные направления.

2. Цифровая кафедра. В 2023 г. обучение по цифровым программам прошли более 900 сту-

дентов, что обеспечивает массовое внедрение цифровых компетенций (AI, Big Data, кибербезопасность, цифровые двойники).

3. Инновационные лаборатории. Университет создал современные пространства для внедрения BIM-моделирования, цифровых двойников, симуляторов для железнодорожной отрасли.

4. Инкубаторы и акселераторы. Поддержка студенческих стартапов, проектных инициатив и НИОКР. Ежегодно студенческие инновационные проекты получают грантовую поддержку. Успешно работает бизнес-инкубатор, созданный совместно с Октябрьской железной дорогой — филиалом ОАО «РЖД».

Эти методы показывают переход от традиционного лекционно-семинарского формата к практике, основанной на проектных заданиях и цифровых решениях.

Лучшие практики образовательной политики

Одной из наиболее значимых практик ПГУПС стало формирование кросс-функциональных инженерных команд.

- Студенты разных факультетов объединяются для выполнения выпускных квалификационных работ (ВКР) по заказу промышленных партнеров.

- В ходе работы используются цифровые платформы («ВКР-проект»), позволяющие проводить мозговые штурмы, совместное проектирование и обмен документацией.

- Проекты курируются представителями ОАО «РЖД» и регионов.

Результат: выпускники выходят на рынок труда готовыми командами, обладающими опытом междисциплинарного взаимодействия, цифровыми навыками и soft skills.

Формат был апробирован на защите дипломных проектов на Горьковской железной дороге — филиале ОАО «РЖД» в 2024/25 учебном году. В защите проекта участвовали представители

ОАО «РЖД», министерств транспорта регионов и технические эксперты. В рамках проекта обучающиеся ПГУПС представили проект новой железнодорожной линии «Яранск — Котельнич». По результатам защиты проект получил положительную оценку со стороны всех экспертов, команда студентов — предложения о трудоустройстве, а университет укрепил репутацию площадки, где обучающиеся решают реальные задачи индустрии и отрасли. Практика реализации «ВКР-проект» показала эффективность сочетания командной проектной деятельности и итоговой государственной аттестации.

Перспективы развития ПГУПС в рамках «Приоритет-2030»

В среднесрочной и долгосрочной перспективе университет ставит следующие задачи:

- активное участие в проектах новых железных дорог, в том числе высокоскоростных магистралей;
- расширение цифровизации образовательного процесса, внедрение искусственного интеллекта в управление перевозками;
- углубление международных связей: проекты с вузами Китая, Казахстана, Узбекистана;
- привлечение инвестиций и грантов, включая участие в программах Нового банка развития (БРИКС).

Реализация программы «Приоритет-2030» в ПГУПС тесно связана с реализацией Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом до 2035 г. (распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р) [5], которая имеет четыре ключевые цели:

- повышение пространственной связанности и доступности;
- развитие мобильности населения и внутреннего туризма;
- рост объемов и скорости транзита грузов, мультимодальных логистических технологий;

– цифровая и низкоуглеродная трансформация отрасли.

Реализация этих целей невозможна без кадрового сопровождения. Отметим, что подготовка кадров, развитие человеческого капитала и формирование компетенций цифровой экономики являются сквозной задачей для всех отраслей экономики, включая транспорт и строительство. В этом контексте особую роль играет ПГУПС как ведущий железнодорожный вуз отрасли, участвующий в федеральной программе «Приоритет-2030».

Для реализации цели по повышению пространственной связанности и транспортной доступности в университете ведется подготовка инженеров по направлениям: строительство железных дорог, мостов и тоннелей; эксплуатация транспортных систем. В будущем эти специалисты обеспечат кадровое сопровождение проектов по развитию магистральной инфраструктуры (ВСМ, мосты, аэропорты, мультимодальные маршруты).

В рамках задач по повышению мобильности населения и развитию внутреннего туризма ПГУПС осуществляет подготовку специалистов в области управления перевозками, сервисного обслуживания и эксплуатации транспортных систем. Данная деятельность непосредственно способствует решению задачи по сокращению времени в пути «от двери до двери».

Помимо этого, университет участвует в реализации проектов, направленных на создание комфортной среды для пассажиров. Особую значимость имеет экспертное сопровождение учеными ПГУПС проекта высокоскоростной магистрали Москва — Санкт-Петербург.

Для реализации цели по повышению уровня транзита и развитию мультимодальной логистики ПГУПС развивает программы в области логистики, мультимодальных перевозок, цифровых транспортных коридоров, включая подготовку специалистов по работе с международными

транспортными операциями и цифровыми платформами. Научные лаборатории университета исследуют вопросы оптимизации логистических цепей и снижения транзакционных издержек.

Для обеспечения цифровой и низкоуглеродной трансформации транспорта ПГУПС реализует программы цифровой кафедры, курсы по AI и Big Data в транспорте, проекты цифровых двойников инфраструктуры. Исследования ПГУПС по энергосберегающим технологиям железнодорожного транспорта также вносят значительный вклад в достижение поставленной цели. В ПГУПС образовательная политика развивается в логике Университета 4.0: образование → наука → инновации → внедрение в транспортной отрасли.

В «Приоритете-2030» акцент сделан на кросс-функциональные команды студентов и НИОКР, что соответствует задачам стратегии по подготовке кадров для цифровой и низкоуглеродной трансформации. Показатель трудоустройства выпускников ПГУПС (98,5 %) подтверждает, что университет обеспечивает реальную кадровую подпитку транспортной отрасли.

Анализ показывает, что образовательная политика ПГУПС полностью встроена в реализацию Транспортной стратегии РФ. Подготовка кадров, владеющих цифровыми технологиями, междисциплинарными компетенциями и навыками инновационной инженерии, является необходимым условием достижения стратегических целей: от пространственной связанности и повышения мобильности населения до цифровой трансформации и устойчивого развития транспорта [6].

Таким образом, ПГУПС не только выполняет роль академического центра, но и выступает ключевым инструментом реализации транспортной политики России, обеспечивая кадровый и научный фундамент для достижения целей стратегии до 2030–2035 гг.

Вклад ПГУПС в развитие инженерного образования в России:

- Подготовка кадров для крупнейшего работодателя страны — ОАО «РЖД». Уровень трудоустройства выпускников — 98,5 %.

- Вклад в создание модели «исследовательского моста», где научные исследования напрямую интегрируются в образовательный процесс [7].

- Участие в стратегических проектах развития транспортной инфраструктуры РФ.

- Распространение лучших практик (кросс-функциональные команды, цифровая кафедра) в другие транспортные университеты страны.

Таким образом, ПГУПС выступает как флагман инженерного образования, формируя современную образовательную экосистему.

ПГУПС демонстрирует значительные успехи в реализации программы «Приоритет-2030», формируя модель практико-ориентированного, цифрового и междисциплинарного образования. Опыт университета в создании кросс-функциональных команд может служить примером для других вузов.

Будущее транспортного образования в России связано с развитием ВСМ, цифровизацией транспорта, международными партнерствами и интеграцией науки с образовательным процессом. В этих процессах ПГУПС занимает ключевую позицию, укрепляя технологический суверенитет страны и внося весомый вклад в подготовку инженеров нового поколения.

Проведенное исследование позволило получить следующие результаты, характеризующие трансформацию образовательной политики ПГУПС.

В ПГУПС сформирована и апробирована модель подготовки инженеров нового типа. Ключевым результатом стало успешное внедрение формата подготовки кросс-функциональных команд для выполнения ВКР на примере проектирования новой железнодорожной линии «Яранск — Котельнич».

Проект успешно прошел экспертизу: его положительно оценили эксперты ОАО «РЖД» и пред-

ставители региональных министерств транспорта. Более того, члены студенческой команды получили предложения о трудоустройстве уже на этапе защиты диплома. Это подтверждает, что университет стал эффективной площадкой для решения реальных отраслевых задач.

В ПГУПС достигнуты значимые количественные показатели внедрения цифровых компетенций. В 2023 г. более 900 студентов прошли обучение по программам «Цифровой кафедры» (AI, Big Data, кибербезопасность, цифровые двойники), что обеспечило массовое приобретение цифровых навыков, обязательных для современного транспорта.

Вузом подтверждена высокая востребованность выпускников на рынке труда. Уровень трудоустройства выпускников ПГУПС стабильно составляет 98,5 %, что свидетельствует о соответствии подготовки кадров актуальным запросам ключевого работодателя — ОАО «РЖД» и транспортной отрасли в целом.

В университете выстроена система прямой связи образовательных программ с целями Транспортной стратегии РФ. Результатом стратегического планирования стала четкая корреляция между направлениями подготовки в ПГУПС и стратегическими целями государства [8]. Так, подготовка инженеров-строителей и кадров эксплуатационного блока напрямую направлена на достижение цели по повышению пространственной связанности. Образовательные программы в области логистики и мультимодальных перевозок ориентированы на обеспечение кадрами цели по росту транзита грузов. Курсы по AI, Big Data и проекты цифровых двойников обеспечивают кадровое сопровождение цифровой трансформации отрасли [9].

Таким образом, полученные в ходе исследования результаты демонстрируют, что ПГУПС не только декларирует изменения, но и добивается конкретных, измеримых результатов в рамках реализации ПСАЛ «Приоритет-2030».

Дискуссия

Полученные результаты открывают новые перспективы для дальнейших исследований в области развития современного инженерного образования и роли университетов в реализации национальных стратегий Российской Федерации [10].

Успешный опыт ПГУПС по созданию кросс-функциональных команд подтверждает гипотезу о том, что наиболее эффективной формой подготовки инженера будущего является не просто добавление в учебный план IT-дисциплин и дисциплины «Проектная деятельность», а создание комплексной проектной среды с привлечением индустриальных партнеров. В такой среде профессиональные компетенции формируются в условиях, максимально приближенных к реальной инженерной деятельности, где необходимость междисциплинарного взаимодействия является не дополнительным требованием, а естественным условием решения задачи. Это перекликается с глобальным трендом на проектно-ориентированное обучение (Project-Based Learning) как основу инженерного образования.

Представленные результаты исследования свидетельствуют о движении университета к модели «Университет 4.0», где стираются границы между образованием, наукой и индустрией. Высокий процент трудоустройства и прямой запрос на выпускников со стороны индустриального партнера показывают, что университет становится не просто поставщиком кадров, а интегральным элементом инновационной экосистемы отрасли. Это позволяет говорить о формировании «исследовательского моста», когда реальные производственные вызовы немедленно транслируются в учебные и научные задачи, а их решения, в свою очередь, быстро внедряются в практику.

В-третьих, необходимо отметить системный характер преобразований. Успех кросс-функциональных команд был бы невозможен без создания цифровой кафедры, инновационных

лабораторий и отлаженного механизма взаимодействия с индустриальными партнерами. Этот формат обеспечивает трансфер знаний из НИР/НИОКР в образовательную деятельность, а также привлечение молодых кадров для дальнейшей научно-исследовательской работы в ПГУПС — в аспирантуре и после ее окончания. Сотрудничество продолжается как в форме научно-педагогической карьеры в университете (в качестве представителя работодателя), так и в форме представителя стороны-заказчика новых НИР/НИОКР.

Отметим, что модернизация инженерного образования — это комплексный процесс, требующий синхронного развития инфраструктуры, содержания программ и форматов взаимодействия с партнерами [11].

Следует обозначить и возможные ограничения исследования. Представленная модель, будучи эффективной для крупного отраслевого университета с сильным индустриальным партнером, может столкнуться с трудностями при попытке масштабирования на вузы, не имеющие столь тесной интеграции с конкретным сектором экономики. Кроме того, долгосрочное влияние таких команд на карьерные траектории выпускников и их инновационный потенциал требует дальнейшего лонгитюдного изучения.

Перспективы дальнейших исследований видятся в сравнительном анализе моделей ПГУПС и других участников «Приоритет-2030» для выявления универсальных и уникальных элементов успешной трансформации [12–14].

В заключение отметим: опыт ПГУПС демонстрирует, что стратегически выверенная образовательная политика, нацеленная на подготовку инженеров новой формации — способных работать на стыке дисциплин, — является критически важным условием обеспечения технологического суверенитета и достижения национальных стратегических целей в высокотехнологичных отраслях, таких как транспорт.

Список источников

1. Гусева А. И. Первый год реализации программы «Приоритет-2030»: позитивные результаты и проблемные направления университетов исследовательского трека / А. И. Гусева, В. М. Калашник, В. И. Каминский, С. В. Киреев // *Высшее образование в России*. — 2023. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pervyy-god-realizatsii-programmy-prioritet-2030-pozitivnye-rezultaty-i-problemnye-napravleniya-universitetov-issledovatel'skogo> (дата обращения: 24.09.2025).
2. Приоритет-2030: официальный сайт проекта. — URL: <https://priority2030.ru/> (дата обращения: 03.09.2025).
3. Панычев А. Ю. Отраслевой университет на фронтире технологического суверенитета / А. Ю. Панычев, О. Д. Покровская, А. Б. Никитин, В. Я. Соловьева // *Техник транспорта: образование и практика*. — 2022. — Т. 3. — № 4. — С. 364–375. — DOI: 10.46684/2687-1033.2022.4.364-375.
4. Слотина Т. В. Формирование студенческих команд и их подготовка к реализации коллективного проекта / Т. В. Слотина, М. А. Дроздова, С. В. Корнева и др. // *Человеческий фактор: Социальный психолог*. — 2025. — № 3(55). — С. 384–390.
5. Транспортная стратегия Российской Федерации. — URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozm-na-period-do-2035-goda> (дата обращения: 03.09.2025).
6. Зорина О. С. Об особенностях подготовки современных инженеров / О. С. Зорина // *Педагогический журнал*. — 2023. — Т. 13. — № 1А. — С. 352–358. — DOI: 10.34670/AR.2023.17.75.041.
7. Конкин В. О. Сравнительный анализ системы мотивации педагогических сотрудников российских и зарубежных вузов: управленческие и маркетинговые аспекты / В. О. Конкин, А. А. Коваленко, М. А. Дроздова // *Экономика устойчивого развития*. — 2024. — № 2(58). — С. 129–131.
8. Авдийский В. И. Современные подходы подготовки кадров как элемент обеспечения национальной безопасности в условиях политических и экономических санкций / В. И. Авдийский // *Вестник евразийской науки*. — 2023. — Т. 15. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/77ECVN123.pdf>.
9. Кузнецова А. Р. Тенденции подготовки кадров высшей квалификации в Российской Федерации / А. Р. Кузнецова, А. И. Ахметьянова, А. И. Кузнецов // *Siberian Socium*. — 2023. — Т. 7. — № 1(23). — С. 71–87. — DOI: 10.21684/2587-8484-2023-7-1-71-87.
10. Басюк В. С. Особенности организации подготовки научных и научно-педагогических кадров в России: исторический опыт и современное состояние / В. С. Басюк, Н. А. Краснощеков // *Вестник Московского университета. Серия 20: Педагогическое образование*. — 2023. — № 4. — С. 7–42.
11. Кондратьев В. В. Концепции инженерного образования в современных условиях / В. В. Кондратьев, Р. Дреер, М. Н. Кузнецова // *КПЖ*. — 2022. — № 5(154). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsii-inzhenernogo-obrazovaniya-v-sovremennyh-usloviyah> (дата обращения: 24.09.2025).
12. Панычев А. Ю. Роль современного вуза в формировании технологического суверенитета страны / А. Ю. Панычев, О. Д. Покровская // *Alma Mater (Вестник высшей школы)*. — 2023. — № 4. — С. 11–19. — DOI: 10.20339/AM.04-23.011.
13. Рыбин П. К. Выполнение мультипрофильных проектов по заказу индустриального партнера как новый формат реализации ВКР в транспортном вузе / П. К. Рыбин, А. В. Бенин, М. А. Дроздова // VI Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов: в 2 т. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. — Т. 1. — С. 127–131.
14. Панычев А. Ю. Школа инженерного предпринимательства как основа облика транспортного университета четвертого поколения / А. Ю. Панычев, О. Д. Покровская, Л. С. Блажко и др. // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2022. — Т. 19. — № 2. — С. 161–181. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-161-181.

Дата поступления: 30.09.2025

Решение о публикации: 31.10.2025

Контактная информация:

РЫБИН Петр Кириллович — канд. техн. наук, доц.,
первый проректор — проректор по учебной работе,
проф. кафедры «Железнодорожные станции и узлы»;
rybin@pgups.ru

ДРОЗДОВА Мария Александровна — канд. юрид.
наук, доц., доц. кафедры «Логистика и коммерческая
работа», заместитель начальника учебного управления;
drozdova@pgups.ru

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук,
доц., начальник научно-исследовательской части,
доц. кафедры «Механика и прочность материалов
и конструкций»; benin@pgups.ru

The Educational Policy of SPTU within the Framework of the Priority-2030 Programme: Prospects for Development, Best Practices, and Contribution to Engineering Education

P. K. Rybin, M. A. Drozdova, A. V. Benin

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

For citation: Rybin P. K., Drozdova M. A., Benin A. V. The Educational Policy of SPTU within the Framework
of the Priority-2030 Programme: Prospects for Development, Best Practices, and Contribution to Engineering
Education // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 845–855.
(In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-845-855

Summary

Purpose: To analyse the educational policy at Petersburg State Transport University (SPTU) within the framework of the Priority-2030 programme, to identify best practices and achievements, to evaluate future development prospects, and to assess the University's contribution to the development of engineering education in Russia. **Methods:** Analysis of SPTU's strategic documents alongside the Russian Federation Transport Strategy, a case study focused on the presentation of diploma projects related to the Gorky Railway, a comparative analysis of conventional and innovative training models, and quantitative assessment such as graduate employment statistics, and the extent of digital programme implementation. **Results:** The effective establishment of cross-functional engineering teams to complete final qualification theses commissioned by industrial partners has become a significant achievement, particularly highlighted by the Yaransk-Kotelnich case. This initiative has facilitated the establishment of an effective “research bridge” grounded in the framework of “industry demand → education and science → integration” scheme. **Practical significance:** The proposed model for transforming SPTU into “University 4.0”, which is embedded within the industry ecosystem, can serve as a compelling example for other universities. The experience gained in forming cross-functional teams and aligning education with the real-world projects of industrial partners can be scaled and adapted, thereby directly addressing the human resource requirements of the transport industry and advancing the objectives of national strategies. This approach will enhance Russia's technological sovereignty and competitiveness.

Keywords: Priority 2030, university educational policy, transport education, engineering education.

References

1. Guseva A. I., Kalashnik V. M., Kaminskiy V. I., Kireev S. V. Pervyy god realizatsii programmy "Prioritet-2030": pozitivnye rezul'taty i problemnye napravleniya universitetov issledovatel'skogo treka [The first year of implementing the "Priority 2030" program: positive results and problematic areas of research-track universities]. *Vyshee obrazovanie v Rossii* [Higher Education in Russia]. 2023, Iss. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/pervyy-god-realizatsii-programmy-prioritet-2030-pozitivnye-rezultaty-i-problemnye-napravleniya-universitetov-issledovatel'skogo> (accessed: September 24, 2025). (In Russian)
2. *Prioritet-2030: ofitsial'nyy sayt proekta* [Priority 2030: official project website]. Available at: <https://priority2030.ru/> (accessed: September 3, 2025). (In Russian)
3. Panychev A. Yu., Pokrovskaya O. D., Nikitin A. B., Solov'eva V. Ya. Otravleniy universitet na frontire tekhnologicheskogo suvereniteta [An industry university at the frontier of technological sovereignty]. *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Transport Technician: Education and Practice]. 2022, vol. 3, Iss. 4, pp. 364–375. DOI: 10.46684/2687-1033.2022.4.364-375. (In Russian)
4. Slotina T. V., Drozdova M. A., Korneva S. V. et al. Formirovaniye studencheskikh komand i ikh podgotovka k realizatsii kollektivnogo proekta [Formation of student teams and their preparation for the implementation of a collective project]. *Chelovecheskiy faktor: Sotsial'nyy psikholog* [Human Factor: Social Psychologist]. 2025, Iss. 3(55), pp. 384–390. (In Russian)
5. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii* [Transport Strategy of the Russian Federation]. Available at: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (accessed: September 3, 2025). (In Russian)
6. Zorina O. S. Ob osobennostyakh podgotovki sovremennykh inzhenerov [On the specifics of training modern engineers]. *Pedagogicheskiy zhurnal* [Pedagogical Journal]. 2023, vol. 13, Iss. 1A, pp. 352–358. DOI: 10.34670/AR.2023.17.75.041. (In Russian)
7. Konkin V. O., Kovalenko A. A., Drozdova M. A. Sravnitel'nyy analiz sistemy motivatsii pedagogicheskikh sotrudnikov rossiyskikh i zarubezhnykh vuzov: upravlencheskie i marketingovye aspekty [Comparative analysis of the motivation system for teaching staff at Russian and foreign universities: managerial and marketing aspects]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of Sustainable Development]. 2024, Iss. 2(58), pp. 129–131. (In Russian)
8. Avdiyskiy V. I. Sovremennye podkhody podgotovki kadrov kak element obespecheniya national'noy bezopasnosti v usloviyakh politicheskikh i ekonomicheskikh sanktsiy [Modern approaches to personnel training as an element of ensuring national security under political and economic sanctions]. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Eurasian Science Bulletin]. 2023, vol. 15, Iss. 1. Available at: <https://esj.today/PDF/77ECVN123.pdf> (accessed: 24.09.2025). (In Russian)
9. Kuznetsova A. R., Akhmet'yanova A. I., Kuznetsov A. I. Tendentsii podgotovki kadrov vysshey kvalifikatsii v Rossiyskoy Federatsii [Trends in training highly qualified personnel in the Russian Federation]. *Siberian Socium*, 2023, vol. 7, Iss. 1(23), pp. 71–87. DOI: 10.21684/2587-8484-2023-7-1-71-87. (In Russian)
10. Basyuk V. S., Krasnoshchekov N. A. Osobennosti organizatsii podgotovki nauchnykh i nauchno-pedagogicheskikh kadrov v Rossii: istoricheskiy opyt i sovremennoe sostoyaniye [Features of organizing the training of scientific and academic-teaching personnel in Russia: historical experience and current state]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 20: Pedagogicheskoe obrazovanie* [Moscow University Bulletin. Series 20: Pedagogical Education]. 2023, Iss. 4, pp. 7–42. (In Russian)
11. Kondrat'ev V. V., Dreer R., Kuznetsova M. N. Kontseptsii inzhenernogo obrazovaniya v sovremennykh usloviyakh [Concepts of engineering education in modern conditions]. *KPZh* [KPJ]. 2022, Iss. 5(154). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsii-inzhenernogo-obrazovaniya-v-sovremennykh-usloviyakh> (accessed: September 24, 2025). (In Russian)
12. Panychev A. Yu., Pokrovskaya O. D. Rol' sovremen-nogo vuza v formirovanii tekhnologicheskogo suvereniteta strany [The role of a modern university in shaping the country's technological sovereignty]. *Alma Mater (Vestnik vysshey*

shkoly) [Alma Mater (Higher School Bulletin)]. 2023, Iss. 4, pp. 11–19. DOI: 10.20339/AM.04-23.011. (In Russian)

13. Rybin P. K., Benin A. V., Drozdova M. A. Vypolnenie mul'tiprofil'nykh proektov po zakazu industrial'nogo partnera kak novyy format realizatsii VKR v transportnom vuze [Implementation of multi-profile projects commissioned by an industrial partner as a new format for final qualification work in a transport university]. *VI Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov: v 2 t.* [VI Betancourt International Engineering Forum: Proceedings: in 2 vols.]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2024, vol. 1, pp. 127–131. (In Russian)

14. Panychev A. Yu., Pokrovskaya O. D., Blazhko L. S. et al. Shkola inzhenernogo predprinimatel'stva kak osnova oblika transportnogo universiteta chetvertogo pokoleniya [School of engineering entrepreneurship as the foundation of the fourth-generation transport university's image]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*

[Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 2, pp. 161–181. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-161-181. (In Russian)

Received: September 30, 2025

Accepted: October 31, 2025

Author's information:

Petr K. RYBIN — PhD in Engineering, Associate Professor, First Vice-Rector — Vice-Rector for Academic Affairs, Professor of the Department of Railway Stations and Junctions; rybin@pgups.ru

Maria A. DROZDOVA — PhD in Law, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Commercial Work, Deputy Head of the Academic Department; drozdova@pgups.ru

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Research Department, Associate Professor of the Department of Mechanics and Strength of Materials and Structures; benin@pgups.ru

УДК 625.03

Ударное воздействие от колес подвижного состава, имеющих изолированные неровности

А. В. Романов, Ю. П. Бороненко, А. А. Киселев, М. В. Зимакова

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

Для цитирования: Романов А. В., Бороненко Ю. П., Киселев А. А., Зимакова М. В. Ударное воздействие от колес подвижного состава, имеющих изолированные неровности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 856–868. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-856-868

Аннотация

Цель: Разработка и верификация математической модели для расчета дополнительной динамической силы ударного воздействия от колес подвижного состава с изолированными неровностями (ползунами) на железнодорожный путь, а также создание упрощенной инженерной методики для практического применения. **Методы:** В основе исследования лежит аналитическое решение А.Я. Когана, описывающее динамику взаимодействия дефектного колеса с рельсом. Для численного моделирования используется среда Wolfram Mathematica. Модель верифицирована путем сопоставления с экспериментальными данными, полученными в результате измерения по тензометрическим схемам, собранным на шейке рельса. Для создания инженерной методики применен трехпараметрический регрессионный анализ. **Результаты:** Разработана и верифицирована математическая модель, адекватно отражающая физическую сущность процесса (расхождение с экспериментом в большинстве случаев не превышает 10 %). Установлено, что сила существенно возрастает (в 2–5 раз) с увеличением глубины неровности. Зависимость от скорости носит немонотонный характер с максимумом при 40–50 км/ч. Рост модуля упругости пути приводит к увеличению амплитуды силы и ускорению ее затухания. Предложена упрощенная регрессионная зависимость для инженерного расчета, обеспечивающая высокую точность ($R^2 = 0,995$) при глубинах неровности свыше 0,6 мм. **Практическая значимость:** Результаты работы создают научно-методическую основу для оценки ударных нагрузок от подвижного состава с дефектами колес. Разработанная модель и инженерная методика применимы для диагностики состояния пути, прогнозирования вибрационного воздействия, а также для целей проектирования и обеспечения долговечности железнодорожной инфраструктуры и безопасности движения.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, подвижной состав, изолированная неровность, ударное воздействие, динамическая сила.

Введение

Движение подвижного состава, на колесах которого есть изолированные неровности (ползуны), создает ударные нагрузки, передающиеся на железнодорожный путь. Эти удары вызывают не только повышенные силовые, но и значительные вибрационные воздействия.

Экспериментальные данные показывают, что при наличии ползунов суммарные вертикальные

динамические силы инерции могут достигать 400 кН [1].

Повышенная вибрация, передаваемая в грунт земляного полотна, существенно снижает его прочностные характеристики: угол внутреннего трения, удельное сцепление и модуль деформации. Поэтому прогнозирование уровня силового воздействия на путь от ударов колес с неровностями является важной практической задачей.

Вертикальная динамическая сила инерции, возникающая из-за качения колеса, имеющего изолированную неровность в виде ползуна

Решение задачи по определению вертикальной динамической силы инерции, действующей на железнодорожный путь и возникающей при качении колеса, имеющего изолированную неровность в виде ползуна, предложено А. Я. Коганом. В начале статьи с целью формирования логики изложения авторы посчитали необходимым привести основные зависимости, опубликованные в [2–4].

Траектория движения центра колеса при наличии на его поверхности ползуна описывается уравнением:

$$\xi(Vt) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ r\omega_0^2 \frac{t^2}{2} & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{\alpha}{2\omega_0}; \\ \frac{r(\alpha - \omega_0 t)^2}{2} & \text{при } \frac{\alpha}{2\omega_0} \leq t \leq \frac{\alpha}{\omega_0}; \\ 0 & \text{при } t \geq \frac{\alpha}{\omega_0}, \end{cases} \quad (1)$$

где α — центральный угол на колесе, соответствующий длине ползуна e_n ;

$$\alpha = \arccos\left(\frac{2r^2 - e_n^2}{2r^2}\right).$$

Здесь e_n — длина ползуна, которая связана с его глубиной δ_0 и радиусом колеса r известным выражением:

$$e_n = 2\sqrt{2r\delta_0}; \quad (2)$$

ω_0 — угловая скорость вращения колеса:

$$\omega_0 = \frac{V}{r}. \quad (3)$$

Здесь V — скорость движения, м/с;

t — время, с.

Опуская промежуточные рассуждения, приведенные в [2–4], итоговая формула для вычисления

дополнительной вертикальной динамической силы, возникающей в контакте колеса и рельса при движении колеса, имеющего изолированную неровность в виде ползуна, определяется по формуле:

$$Q_{\text{дп}}(t) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(e_n - 2r \frac{\sin n \frac{e_n}{2r}}{n} \right) \frac{1}{n^2} \left| W_p \left(in \frac{V}{r} \right) \right| \times \\ \times \cos \left[n \frac{V}{r} (t - T_n) + \arg W_p \left(in \frac{V}{r} \right) \right]. \quad (4)$$

где n — индекс суммирования;

i — мнимая единица;

$W_p(i\omega)$ — частотная характеристика со входом по неровности и выходом по динамической силе в контакте колеса и рельса:

$$W_p(i\omega) = \frac{1}{W(i\omega) - W_z^0(0, i\omega) - \frac{1}{C_k^0}}. \quad (5)$$

Здесь $W_z^0(0, i\omega)$ — частотная характеристика системы $W_z^0(u, i\omega)$ со входом по динамической силе в контакте колеса и рельса $Q(t)$ и выходом по прогибу рельса в сечении под этой силой $z_p^0(t)$, при $u = 0$;

$W(i\omega)$ — частотная характеристика системы с входом по динамической силе в контакте колеса и рельса $Q(t)$ и выходом по вертикальному перемещению колесного центра $z(t)$ от действия этой силы, определяемая выражением:

$$W(i\omega) = \frac{M_1 \omega^2 - if_1 \omega - c_1}{M_1 M_0 \omega^4 - ((M_1 + M_0) \omega^2 (if_1 \omega + c_1))}; \quad (6)$$

C_k^0 — жесткость в контакте колеса и рельса, которая связана с модулем упругости пути и коэффициентом соотносительной жесткости известным выражением:

$$C_k^0 = \frac{2U_z^0}{k_z}, \quad k_z = \sqrt[4]{\frac{U_z^0}{4EI}}; \quad (7)$$

M_1 — обрессоренная масса, приходящаяся на колесо;

M_0 — необрессоренная масса, приходящаяся на колесо;

f_1 — демпфирование в связи обрессоренной и необрессоренной масс;

c_1 — жесткость связи обрессоренной и необрессоренной масс;

T_n — время сближения переднего края ползуна с рельсом:

$$T_n = \frac{e_n}{2V}. \quad (8)$$

Таким образом, из выражения (4) определяются значения дополнительной динамической силы инерции, возникающей при ударном воздействии колеса, имеющего изолированную неровность в форме ползуна на рельс железнодорожного пути в зависимости от различных параметров.

Моделирование вертикальной динамической силы воздействия на путь от колеса, имеющего изолированную неровность на поверхности катания в виде ползуна

Для численного моделирования и расчета дополнительной динамической силы $Q_{дп}(t)$, возникающей при ударном воздействии колеса с ползуном, был реализован алгоритм на основе аналитического решения А. Я. Когана, представленного в предыдущем подразделе. В качестве среды для вычислений использовалась система Wolfram Mathematica, обеспечивающая необходимый инструментарий для символьных и численных операций, в частности для работы с частотными характеристиками и дискретными преобразованиями.

В основе алгоритма лежит расчет по формуле (4), которая представляет динамическую силу как суперпозицию гармонических составляющих через частотную характеристику системы $W_p(i\omega)$.

Данный подход был выбран как наиболее удобный для численной реализации, поскольку он позволяет избежать прямого вычисления импульсных переходных характеристик и сводит задачу к определению отклика системы на гармоническое воздействие.

Для перехода от непрерывных функций к дискретным представлениям, пригодным для численных расчетов, заданы следующие параметры временной и частотной сетки:

– шаг дискретизации по времени выбран $dt = 0,0005$ с;

– количество отсчетов по времени (размерность массива данных) принято $N_t = 150$.

Остальные параметры дискретизации и частотной сетки являются производными от принятых выше:

– полное время моделирования $T = (N_t - 1)dt = 0,0745$ с;

– максимальная частота дискретизации $f_s = 1/dt = 2000$ Гц ;

– частотное разрешение $df = \frac{1}{T} = 13,4228$ Гц.

На основе этих параметров сформированы векторы:

– времени: $t = [0, dt, 2dt, \dots, (N_t - 1)dt]$;

– круговых частот:

$\omega = 2\pi f$, где $f = [0, df, 2df, \dots, (N_t - 1)df]$.

Алгоритм расчета дополнительной динамической силы воздействия на путь от колеса, имеющего изолированную неровность на поверхности катания в виде ползуна, реализован в несколько этапов:

1. При заданной глубине ползуна и скорости движения вычисляются его длина e_n и время контакта T_n .

2. Вычисляются частотные характеристики $W_z^0(0, i\omega)$, $W(i\omega)$ и $W_p(i\omega)$.

3. Динамическая сила $Q_{дп}(t)$ рассчитывается путем дискретного суммирования по 1000 гармоникам в соответствии с формулой (4).

Реализованная функция возвращает массив значений $Q_{\text{дп}}(t_i)$ для всех моментов времени t_i в соответствии с принятым вектором времени.

Данная реализация позволяет эффективно исследовать влияние ключевых параметров (скорости, глубины дефекта, состояния пути) на уровень ударного воздействия, что является основой для последующего прогнозирования вибрационного воздействия, передаваемого на железнодорожный путь.

Анализ и верификация результатов моделирования

В соответствии с представленной методикой выполнено моделирование дополнительной динамической силы воздействия от колеса, имеющего изолированную неровность на рельс.

На рис. 1 представлены результаты моделирования для скорости движения $V = 20, 40, 60$ км/ч, глубины неровности $\delta = 1, 2, 3$ мм и модуля упругости подрельсового основания $U_z^0 = 40, 60, 80$ МПа.

Проведенное моделирование динамической силы, возникающей при взаимодействии колеса, имеющего изолированную неровность в виде ползуна, с рельсом, позволило выявить универсальные закономерности динамического отклика системы, сохраняющиеся при различных сочетаниях исследуемых параметров.

Динамический отклик системы характеризуется четко выраженной четырехфазной структурой. Первоначальная фаза ударного воздействия, наблюдающаяся в период $(0-0,005)$ с) характеризуется предварительной «обезгрузкой» системы, резким снижением динамической силы перед непосредственным ударом. Образование такого динамического «провала» наблюдается на глубину до 30–100 % от амплитуды последующего удара.

Вторая фаза ударного воздействия наблюдается в период $(0,005-0,015)$ с) и характеризуется резким, практически мгновенным ростом дина-

мической силы до ее максимальных значений. Данная фаза демонстрирует формирование высокоамплитудного импульса с ярко выраженным пиком и ожидаемое проявление существенной нелинейности системы в момент контакта.

Фаза постударной обезгрузки, которая фиксируется в период $(0,015-0,025)$ с) характеризуется резким снижением дополнительной динамической силы в отрицательную область с амплитудой до 70–80 % от величины пиковой нагрузки. Следует учитывать, что суммарная сила — суперпозиция отрицательных значений дополнительной динамической силы и статической силы (как в фазе первоначальной разгрузки, так и в фазе постударной разгрузки) — не должна переходить в отрицательную область, то есть приводить к отрыву колеса от рельса. Данный аспект необходимо принять во внимание при дальнейшем моделировании.

В последующий период $(0,025-0,075)$ с) наблюдается колебательный процесс с постепенным затуханием амплитуды. Данная фаза характеризуется наличием нескольких циклов колебаний с асимптотическим стремлением к установившемуся значению вертикальной силы.

Влияние модуля упругости пути на динамику воздействия силы при взаимодействии колеса с изолированной неровностью (в виде ползуна) и рельса проявляется следующим образом: с ростом модуля упругости увеличивается амплитуда силы — как в фазах разгрузки, так и в фазе удара.

При увеличении модуля упругости с 40 до 80 МПа амплитуда силы может возрасти в 1,5–2 раза — в зависимости от скорости движения и глубины неровности.

Кроме того, при максимальных значениях модуля упругости наблюдаются два эффекта:

- более быстрое затухание колебаний (по сравнению с конструкцией пути меньшей жесткости);
- более длительный характер колебательного процесса для путей с меньшей жесткостью.

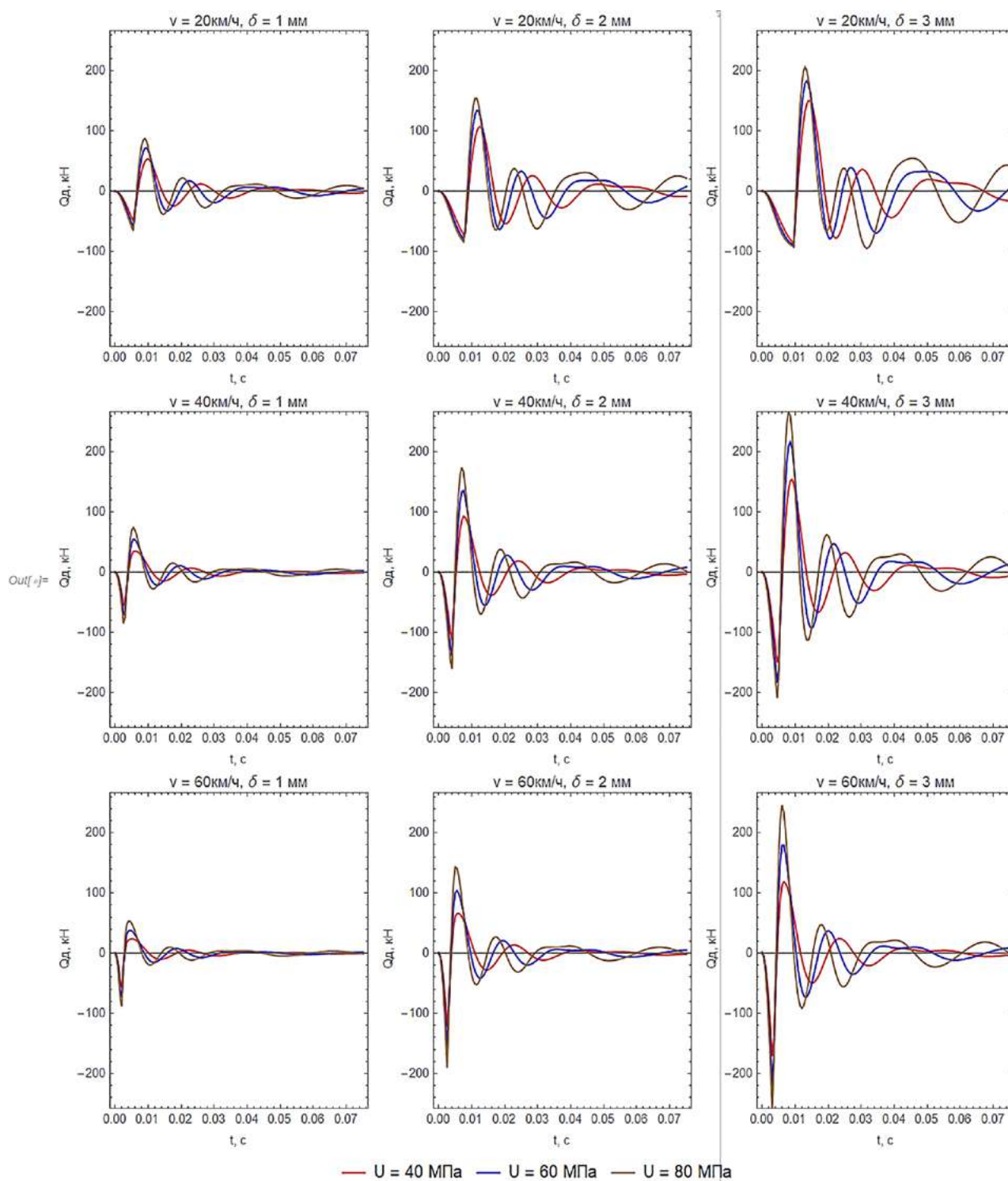


Рис. 1. Результаты моделирования дополнительной динамической силы воздействия от колеса, имеющего изолированную неровность, на рельс

Влияние скорости движения на величину динамической силы удара выражается в росте динамической силы при увеличении скорости движения

с 20 до 40 км/ч с последующим уменьшением величины силы при дальнейшем росте скорости до 60 км/ч. Такая картина наблюдается для всех

вариантов расчета как по варьированию глубины неровности, так и по модулю упругости подрельсового основания. Этот факт требует более детального анализа с подробной дискретизацией варьируемых параметров. Тем не менее на этой стадии исследования можно сделать вывод, что при относительно высокой скорости движения наблюдается укороченная длительность импульсного воздействия, по сравнению с растянутым откликом во времени при низких скоростях движения.

Увеличение глубины неровности весьма существенно влияет на рост амплитуды силового воздействия. При увеличении глубины от 1 до 3 мм силовое воздействие, в зависимости от иных параметров варьирования, увеличивается от двух до пяти раз и сопровождается как усилением нелинейных эффектов, так и усложнением формы отклика системы на импульсное ударное воздействие. В то же время при незначительных глубинах неровности форма колебаний приобретает более стандартный вид и предсказуемый характер затухания.

Полученные в результате моделирования зависимости весьма хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований ударного воздействия.

Моделирование ударного воздействия колеса, имеющего изолированную неровность в виде ползуна, верифицировано по результатам экспериментальных исследований, выполненных АО «НВЦ “Вагоны”» в 2020 г. В рамках эксперимента были проведены испытания по определению силового воздействия от колеса (с дефектами на поверхности катания и без дефектов) грузового подвижного состава на железнодорожный путь, которое было зарегистрировано посредством «Цифровой программно-аппаратной платформы для автоматизированного мониторинга технического состояния подвижного состава».

Эксперимент проводился на железнодорожном пути, содержащем два измерительных рельса длиной 12,5 м, оборудованных тензорезисторами

и модулями тензоизмерений. Оборудование регистрировало вертикальную динамическую силу воздействия от колес подвижного состава на рельсы по методу двух сечений (разработанному на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО ПГУПС [5–10]).

Эксперимент проводился с вагоном-цистерной в порожнем и груженом состоянии, на колесах которой были сформированы изолированные неровности (ползуны) глубиной 1 мм, 2 мм, 3 мм и 4 мм, а также несколько колес были без неровностей. Скорость движения цистерны по участку железнодорожного пути, оборудованного измерительной схемой, варьировалась от 5 до 15 км/ч.

На рис. 2, а представлена запись силового воздействия, зарегистрированная посредством «Цифровой программно-аппаратной платформы для автоматизированного мониторинга технического состояния подвижного состава» в рамках экспериментальных исследований, выполненных АО «НВЦ “Вагоны”» в 2020 г. В качестве примера представлен отклик системы при наезде на рельс колесной пары с ползуном глубиной 3 мм. График явно демонстрирует процесс разгрузки рельса как перед ударом ползуна, так и после него. Абсолютное значение ударного воздействия с учетом статической нагрузки, как видно из графика, составляет 136 кН. Статическая нагрузка — 30 кН. Таким образом, величину дополнительной силы можно принять за 106 кН.

На графике справа (рис. 2, б) представлены результаты моделирования ударного воздействия ползуна глубиной 3 мм при скорости движения 9,7 км/ч и модуле упругости пути $U_z^0 = 45$ МПа. Очевидно, что результаты моделирования весьма хорошо коррелируют с представленной экспериментальной записью как по абсолютным значениям пиков нагрузки и обезгрузки, так и по характеру, периодам и частоте колебательного процесса.

С целью дальнейшей верификации результатов моделирования с экспериментальными

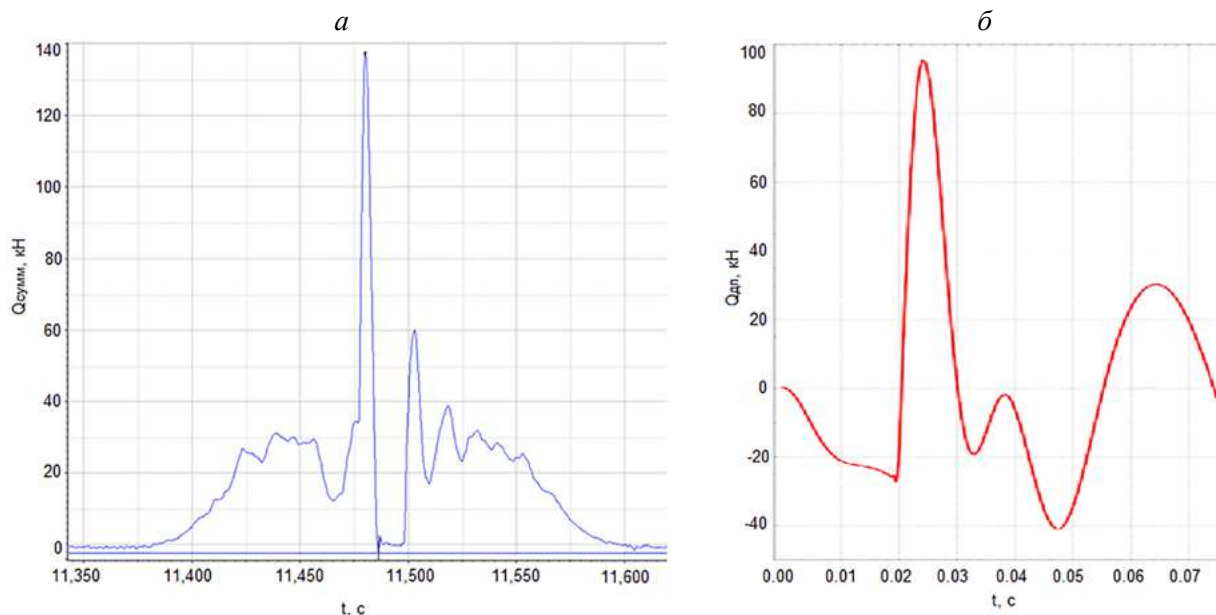


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных (а) и результатов моделирования (б) ударного воздействия ползуна глубиной 3 мм при скорости движения 9,7 км/ч

значениями были выполнены многовариантные расчеты в условиях, сопоставимых с экспериментом. Глубина изолированной неровности на колесе варьировалась со значениями 1, 2, 3 и 4 мм. Скорость движения задавалась та же, что и была зафиксирована в ходе эксперимента с порожней и груженой платформой. Модуль упругости пути в ходе эксперимента не измерялся, однако результаты моделирования весьма хорошо коррелируют с экспериментальными данными при модуле упругости $U_z^0 = 45$ МПа.

В табл. 1 представлены результаты сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования. Сравнение осуществляется по максимальным значениям дополнительной динамической силы (единственному значению в пределах рассматриваемой временной сетки).

Анализ результатов сравнения, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели, исходя из следующих факторов:

1. В большинстве случаев расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными не превышает 10 %, что

свидетельствует о том, что модель корректно отражает физическую сущность процесса ударного динамического воздействия колес подвижного состава, имеющих изолированные неровности на поверхности катания, на рельсы.

2. Результаты моделирования отражают монотонный характер возрастания динамической силы с увеличением скорости движения и глубины неровности в исследуемых диапазонах, что также свидетельствует об адекватности разработанной модели.

3. Полученные существенные расхождения между экспериментальными данными и результатами расчета в отдельных точках свидетельствуют не об ошибках модели, а о случайных погрешностях эксперимента, содержащих физически необъяснимые аномалии. Так, например, при скорости движения 6,12 км/ч ожидаемое значение экспериментальной силы должно быть посередине между 24,7 и 61,4 кН, однако замеренное значение составляет 24,1 кН при ожидаемом значении 52,2 кН в соответствии с расчетом по модели. Таким образом, модель можно рассматривать в данном случае как инструмент верификации эксперимента.

Таблица 1. Сравнение результатов моделирования дополнительной динамической силы, возникающей из-за ударного воздействия от колес подвижного состава, имеющих изолированные неровности, с результатами эксперимента

Скорость движения, км/ч	Дополнительная динамическая сила, $\max Q_{\text{дп}}$, кН (числитель — результаты эксперимента, знаменатель — результаты моделирования) и относительная ошибка, Δ							
	$\delta = 1$ мм		$\delta = 2$ мм		$\delta = 3$ мм		$\delta = 4$ мм	
	$\max Q_{\text{дп}}$, кН	Δ , %	$\max Q_{\text{дп}}$, кН	Δ , %	$\max Q_{\text{дп}}$, кН	Δ , %	$\max Q_{\text{дп}}$, кН	Δ , %
Четырехосная цистерна в порожнем состоянии								
6,12	24,70	−36,8	24,10	−116,6	61,40	−6,0	71,90	0,6
	33,78		52,20		65,11		71,47	
9,7	30,50	−57,9	76,45	2,5	102,30	6,8	102,55	−11,8
	48,15		74,52		95,36		114,63	
14,79	55,40	−4,4	81,35	−24,3	135,20	2,2	153,35	−2,8
	57,82		101,14		132,25		157,67	
Четырехосная цистерна в груженом состоянии								
4,55	16,90	−63,1	33,58	−19,6	54,90	12,4	55,58	1,6
	27,56		40,16		48,08		54,68	
9,91	48,65	−0,8	71,03	−6,6	98,15	1,4	130,69	10,8
	49,03		75,72		96,81		116,55	
13,37	57,32	2,0	88,15	−7,4	128,98	5,5	147,15	1,4
	56,18		94,71		121,89		145,13	

В результате математическую модель следует признать адекватной для применения в инженерных целях. Ее результаты в области отдельных сочетаний глубин неровностей и скоростей движения являются более надежными, по сравнению с экспериментальными данными.

Методика инженерного расчета дополнительной динамической силы воздействия от колеса, имеющего изолированную неровность на рельс

Представленная выше методика адекватно отражает экспериментальные данные, однако является довольно сложной для реализации на инженерном уровне ввиду необходимости производить сложные вычисления частотных характеристик и решения характеристических уравнений в комплексной плоскости.

Для практической реализации представленной модели требуется разработать практическую методику расчета, не требующую сложных итерационных вычислений в комплексной плоскости.

В соответствии с методикой, представленной выше, выполнены расчеты дополнительной динамической силы воздействия от колеса, имеющего изолированную неровность на рельс, для следующих диапазонов варьируемых параметров:

- скорость движения V в диапазоне от 10 до 80 км/ч с шагом 10 км/ч;
- глубина неровности δ в диапазоне от 0,2 до 4 мм с шагом 0,2 мм;
- модуль упругости пути U_z^0 в диапазоне от 40 до 100 МПа с шагом 20 МПа.

На основании трехпараметрического регрессионного анализа выведена зависимость дополнительной динамической силы воздействия от колеса, имеющего изолированную неровность, на рельс от вышеуказанных параметров:

$$Q(U, V, \delta) = (6,83 + 1,08V - 0,0866V^2 + 0,00105V^3) + (8,73 + 1,11V - 0,0279V^2)\delta + (6,25 + 0,214V)\delta^2 - 3,45\delta^3 + 0,300\delta^4 + (-0,446 + 0,0404V - 0,000578V^2)U + (0,278 + 0,0133V)\delta U - 0,0331\delta^2 U. \quad (9)$$

Сопоставление результатов расчета дополнительной динамической силы воздействия от колеса, имеющего изолированную неровность, на рельс, выполненное по формуле (9), представлено на рис. 3.

Статистические метрики модели [11], рассчитанной по формуле (9), по сравнению с формулой (4) представлены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,994$ свидетельствует, что инженерная модель по формуле (9) объясняет 99,46 % данных, предсказанных научной моделью (4). Таким образом, инженерная модель практически идеально повторяет общую форму, тренды и вариативность исходных данных в заданных диапазонах.

2. Средняя абсолютная ошибка $MAE = 5,62$ свидетельствует о том, что в среднем предсказания инженерной модели отличаются от значений научной модели на 5,62 кН. Для большинства инженерных расчетов такой результат следует признать приемлемым, однако для расчетов с малыми значениями глубины неровности данные инженерной модели следует применять с осторожностью.

3. Средняя относительная ошибка 22,43 %, максимальная абсолютная ошибка 33,81 кН и максимальная относительная ошибка величиной 2066 % также свидетельствуют, что предложенная модель имеет зоны, где ее применение недопустимо. На основании анализа результатов, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что к таким зонам следует отнести все значения, которые рассчитаны для глубин неровностей менее 0,6 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная зависимость (9) очень хорошо отражает результаты моделирования по модели (4) для вариантов расчетов с глубиной неровности на колесе, превышающей 0,6 мм.

Выводы

На основе проведенного исследования, посвященного моделированию ударного воздействия колес подвижного состава с изолированными неровностями (ползунами), сформулированы следующие выводы:

1. Разработана и верифицирована математическая модель расчета дополнительной динамической силы, возникающей при взаимодействии колеса с ползуном и рельсом. Модель, основанная на аналитическом решении А. Я. Когана, адекватно отражает физическую сущность процесса и подтверждена экспериментальными данными: в большинстве случаев расхождение не превышает 10 %.

2. На основе моделирования выявлены закономерности динамического отклика системы «колесо — рельс» при ударном воздействии:

- отклик характеризуется четырехфазной структурой: предварительная разгрузка, ударный импульс, постударная разгрузка и затухающие колебания;

- существенное влияние на амплитуду динамической силы и характер взаимодействия оказывают модуль упругости пути, скорость движения и глубина неровности. Остальные факторы являются несущественными.

3. Установлено влияние ключевых параметров на величину динамической силы:

- увеличение глубины неровности приводит к значительному росту амплитуды силы (в 2–5 раз при увеличении глубины неровности от 1 до 3 мм);

- зависимость от скорости движения носит немонотонный характер, максимальные значения динамической силы наблюдаются при скорости движения 40–50 км/ч с последующим ее уменьшением;

- увеличение модуля упругости пути усиливает амплитуду динамической силы и ускоряет процесс затухания колебаний.

4. Предложена упрощенная инженерная методика расчета дополнительной динамической

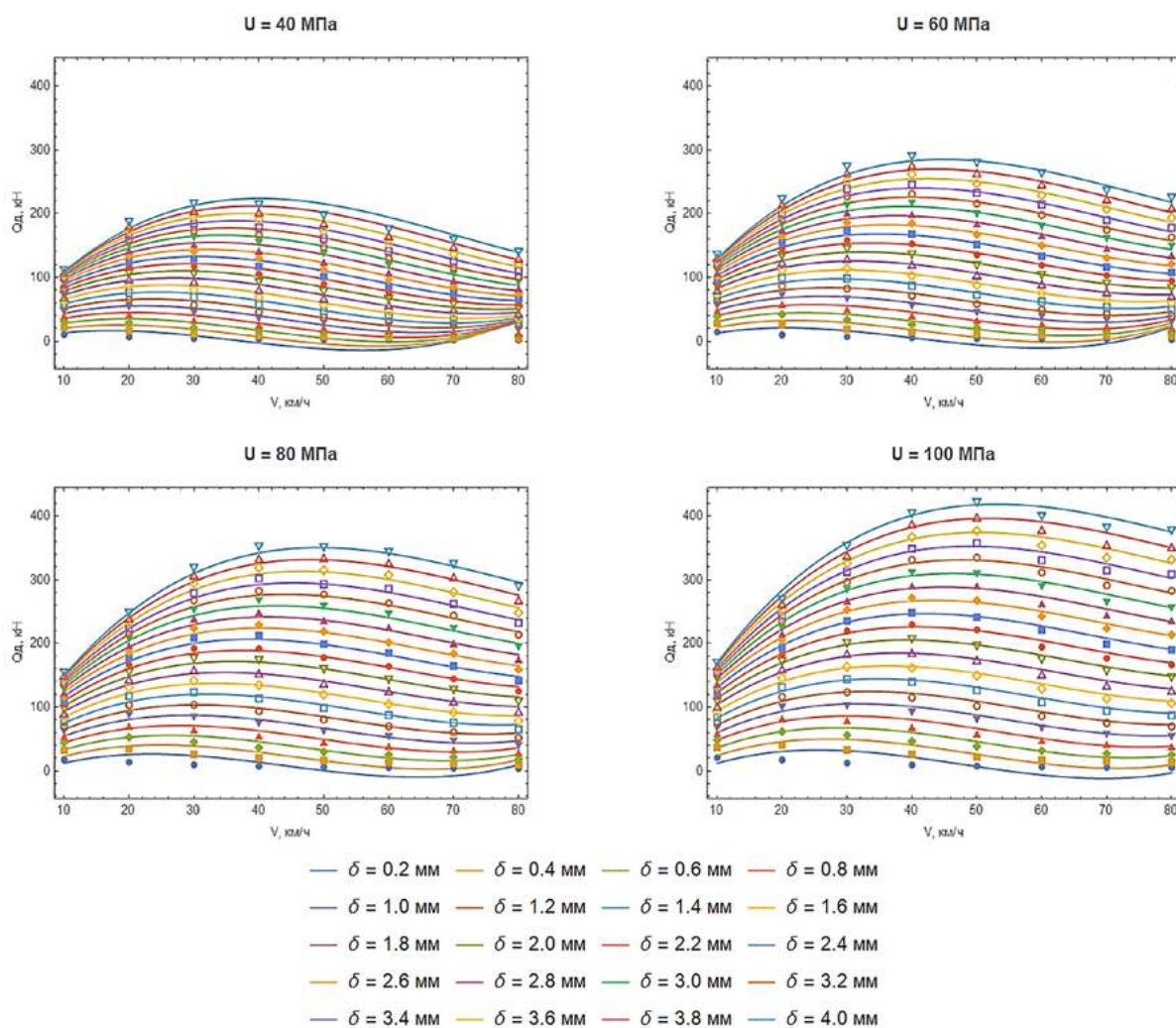


Рис. 3. Результаты сопоставления расчета дополнительной динамической силы воздействия колеса с изолированной неровностью на рельс, полученные по формуле (9)

Таблица 2. Статистические метрики модели

Наименование метрики	Значение
Количество точек	640
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	5,62224
Средняя относительная ошибка	22,4352 %
Максимальная абсолютная ошибка	33,8101
Максимальная относительная ошибка	2065,91 %
Стандартное отклонение ошибок	6,97608
Коэффициент детерминации R^2	0,994599

ской силы в виде регрессионной зависимости (9). Методика обеспечивает высокую точность ($R^2 = 0,995$) для глубин неровности свыше 0,6 мм и применима в инженерной практике для прогнозирования ударных нагрузок.

5. Проведена верификация модели с использованием экспериментальных данных, что подтвердило ее надежность и пригодность для использования в целях диагностики и проектирования железнодорожной инфраструктуры.

Таким образом, результаты расчета создают научно-методическую основу для оценки и прогнозирования ударных воздействий от подвижного состава с дефектами колес, что важно для обеспечения долговечности пути и безопасности движения.

Список источников

1. Романов А. В. Об интенсивности накопления остаточных деформаций пути на особогруженапряженных участках / А. В. Романов, А. А. Киселев // Путь и путевое хозяйство. — 2024. — № 11. — С. 18–22.
2. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ООО «ИПП «КУНА»», 2023. — 280 с.
3. Коган А. Я. Воздействие на путь поездов, имеющих в своем составе вагоны с ползунами на колесных парах / А. Я. Коган // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2014. — № 3. — С. 3–8.
4. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. — М.: Транспорт, 1997. — 326 с.
5. Рахимов Р. В. Нагруженность ходовых частей вагонов и пути и обоснование возможности увеличения осевых нагрузок на железных дорогах Республики Узбекистан: дис. ... д-ра техн. наук / Р. В. Рахимов. — СПб., 2020. — 366 с.
6. Бороненко Ю. П. Кусочно-непрерывное измерение сил между колесом и рельсом по касательным напряжениям в двух сечениях рельса / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, А. А. Петров // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 3(76). — С. 58–64.
7. Бороненко Ю. П. Непрерывное измерение вертикальных нагрузок в контакте между колесом и рельсом по напряжениям в двух сечениях рельса / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сб. тр. XII Санкт-Петербургского

конгресса (Санкт-Петербург, 12–30 ноября 2018 г.). — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018. — С. 37–38.

8. Бороненко Ю. П. Апробация нового метода измерения вертикальной нагрузки от колеса на рельс / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, Д. А. Сергеев и др. // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 1(80). — С. 56–59.

9. Бороненко Ю. П. Измерение боковых нагрузок от колес на рельсы / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 4(83). — С. 45–50.

10. Бороненко Ю. П. Экспериментальное определение боковых нагрузок от взаимодействия колеса с рельсом / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 6(85). — С. 50–53.

11. Оценка качества в задачах классификации и регрессии / Вики-портал ALGOWIKI ИТМО. — URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Оценка_качества_в_задачах_классификации_и_регрессии&mobileaction=toggle_view_desktop (дата обращения: 16.09.2025).

Дата поступления: 20.09.2025

Решение о публикации: 29.11.2025

Контактная информация:

РОМАНОВ Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Железнодорожный путь»; andrey.romanov@mail.ru

БОРОНЕНКО Юрий Павлович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»; boron49@yandex.ru

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доц.; zhdp10@gmail.com

ЗИМАКОВА Мария Викторовна — канд. техн. наук, доц.; mazimm1987@hotmail.com

Wheel-Generated Impact Forces from Railway Rolling Stock with Isolated Irregularities

A. V. Romanov, Yu. P. Boronenko, A. A. Kiselev, M. V. Zimakova

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

For citation: Romanov A. V., Boronenko Yu. P., Kiselev A. A., Zimakova M. V. Wheel-Generated Impact Forces from Railway Rolling Stock with Isolated Irregularities // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 856–868. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-856-868

Summary

Purpose: Development and verification of a mathematical model for calculating the additional dynamic impact force exerted by railway vehicle wheels with isolated irregularities, such as wheel flats or sliders, on the railway track, is presented. Additionally, a simplified engineering method for practical application has been created. **Methods:** The research utilizes the analytical solution by A. Ya. Kogan, which describes the dynamics of the defective wheel – rail interaction. Numerical modelling was conducted using the Wolfram Mathematica environment. The model underwent verification through a comparison with the experimental data gathered from strain gauge circuits positioned on the rail web. A three-parameter regression analysis was employed to establish the engineering methodology. **Results:** A mathematical model has been developed and verified, accurately capturing the physical essence of the process, with discrepancies from experimental data typically not exceeding 10%. The analysis has revealed the nature of the influence of key parameters, namely the force significantly increases (by a factor of 2–5) with deeper irregularities; the relationship with speed is non-monotonic peaking at 40–50 km/h; and an increase in the track elastic modulus enhances the force amplitude while accelerating its decay. A simplified regression dependence for engineering calculations has been proposed, demonstrating a high accuracy ($R^2 = 0.995$) for irregularity depths exceeding 0.6 mm. **Practical significance:** The practical implications of this research establish a scientific and methodological framework for evaluating impact forces resulting from rolling stock wheel defects. The proposed model and engineering methodology can be employed for diagnosing track conditions, predicting vibration impacts, and designing to ensure the durability of railway infrastructure and the safety of operations.

Keywords: Railway track, rolling stock, isolated irregularity, impact load, dynamic force.

References

1. Romanov A. V., Kiselev A. A. Ob intensivnosti nakopleniya ostatochnykh deformatsiy puti na osobogruzonapryazhennykh uchastkakh [On the intensity of accumulation of residual track deformations on heavily loaded sections]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and Track Facilities]. 2024, Iss. 11, pp. 18–22. (In Russian)
2. Kogan A. Ya. *Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom* [Track dynamics and its interaction with rolling stock]. Moscow: OOO “IPP “KUNA” Publ., 2023, 280 p. (In Russian)
3. Kogan A. Ya. Vozdeystvie na put' poezdov, imeyushchikh v svoem sostave vagony s polzunami na kolesnykh parakh [Impact on the track of trains carrying cars with skids on wheelsets]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport]. 2014, Iss. 3, pp. 3–8. (In Russian)
4. Kogan A. Ya. *Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom* [Track dynamics and its interaction with rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1997, 326 p. (In Russian)

5. Rakhimov R. V. *Nagruzhennost' khodovykh chastey vagonov i puti i obosnovanie vozmozhnosti uvelicheniya oseykh nagruzok na zheleznykh dorogakh Respubliki Uzbekistan: dis. ... d ra tekhn. nauk* [Load on wagon running parts and track, and justification of the possibility to increase axle loads on the railways of the Republic of Uzbekistan: Dr. Tech. Sci. diss.]. Saint Petersburg, 2020, 366 pp. (In Russian)
6. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Petrov A. A. *Kusochno-nepreryvnoe izmerenie sil mezhdu kolesom i rel'som po kasatel'nyim napryazheniyam v dvukh secheniyakh rel'sa* [Piecewise continuous measurement of forces between wheel and rail by tangential stresses in two rail sections]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2018, Iss. 3(76), pp. 58–64. (In Russian)
7. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. *Nepreryvnoe izmerenie vertikal'nykh nagruzok v kontakte mezhdu kolesom i rel'som po napryazheniyam v dvukh secheniyakh rel'sa* [Continuous measurement of vertical loads in wheel-rail contact by stresses in two rail sections]. *Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke: sb. tr. XII Sankt Peterburgskogo kongressa (Sankt-Peterburg, 12–30 noyabrya 2018 g.)* [Professional Education, Science and Innovation in the 21st Century. Proc. XII Saint Petersburg Congress (Saint Petersburg, 12–30 November 2018)]. Saint Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2018, pp. 37–38. (In Russian)
8. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Sergeev D. A. et al. *Aprobatsiya novogo metoda izmereniya vertikal'noy nagruzki ot kolesa na rel's* [Testing a new method for measuring vertical load from wheel to rail]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 1(80), pp. 56–59. (In Russian)
9. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. *Izmerenie bokovykh nagruzok ot koles na rel'sy* [Measurement of lateral loads from wheels to rails]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 4(83), pp. 45–50. (In Russian)
10. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. *Eksperimental'noe opredelenie bokovykh nagruzok ot vzaimodeystviya kolesa s rel'som* [Experimental determination of lateral loads from wheel-rail interaction]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 6(85), pp. 50–53. (In Russian)
11. *Otsenka kachestva v zadachakh klassifikatsii i regres-sii* [Quality assessment in classification and regression tasks]. ALGOWIKI Wiki Portal, ITMO. Available at: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Оценка_качества_в_задачах_классификации_и_регрессии&mobileaction=toggle_view_desktop (accessed: September 16, 2025). (In Russian)

Received: September 20, 2025

Accepted: November 29, 2025

Author's information:

Andrey V. ROMANOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the “Railway Track” Department;

andrey.romanov@mail.ru

Yuri P. BORONENKO — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the “Wagons and Wagon Economy”

Department; boron49@yandex.ru

Artem A. KISELEV — PhD in Engineering, Associate Professor; zhdp10@gmail.com

Maria V. ZIMAKOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; mazimm1987@hotmail.com

УДК 625.141.1

Определение интенсивности накопления остаточных деформаций в балластной призме железнодорожного пути в зависимости от степени загрязнения щебеночного балласта угольной пылью

А. В. Качалкин, А. Ф. Колос

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

Для цитирования: Качалкин А. В., Колос А. Ф. Определение интенсивности накопления остаточных деформаций в балластной призме железнодорожного пути в зависимости от степени загрязнения щебеночного балласта угольной пылью // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 869–879. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-869-879

Аннотация

Цель: Определение интенсивности накопления остаточных деформаций в балластной призме в зависимости от степени ее загрязнения угольной пылью. **Методы:** В исследовании скорость накопления остаточных деформаций оценивалась коэффициентом μ , значения которого были получены на основе выполненных циклических трехосных испытаний в установке трехосного сжатия ГТ 1.3.7 и регрессионного анализа. **Результаты:** По данным лабораторных испытаний и регрессионного анализа были установлены значения коэффициента μ , характеризующего интенсивность (скорость) накопления остаточных деформаций в балластной призме. Исследования были выполнены как для чистого щебеночного балласта, так и для загрязненного угольной пылью при влажности 6 %. Результаты показывают, что с увеличением процента загрязнения балласта угольной пылью накопление остаточных деформаций происходит в 1,5 раза интенсивнее. На основе полученных значений коэффициента μ были выполнены расчеты по накоплению остаточных деформаций в балластном слое железнодорожного пути. Расчеты выполнялись с учетом наработки тоннажа 400 млн т брутто и при условии, что несущая способность основной площадки земляного полотна обеспечена, а осадка пути происходит только за счет деформаций балластной призмы. **Практическая значимость:** Результаты исследования дают возможность прогнозировать накопление остаточных деформаций в щебеночном балласте с наработкой тоннажа в зависимости от степени его загрязнения угольной пылью. С учетом вышеизложенного может быть определен срок службы балласта и разработаны мероприятия по техническому обслуживанию железнодорожного пути, позволяющие предотвратить появление отступлений геометрии рельсовой колеи III и IV степени.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, балластный слой, угольная пыль, остаточная деформация, трехосные испытания, щебеночный балласт, осадка пути, степень загрязнения.

Введение

В последние годы компанией ОАО «РЖД» проводится планомерная работа по повышению эффективности перевозок грузов за счет повышения веса и длины грузовых поездов. Увеличение осевых нагрузок является одним из приоритетных направлений, позволяющих обеспечить рост объемов перевозок [1]. Однако повышение

провозной и пропускной способности железнодорожных линий сказывается на состоянии железнодорожного пути из-за повышенного вибродинамического воздействия от подвижного состава. За прошедшие десять лет в системе путевого хозяйства были предприняты значительные меры по модернизации промежуточных рельсовых скреплений, конструкций шпал, лече-

нию земляного полотна, содержанию и ремонту искусственных сооружений, чего нельзя сказать про балластный слой из щебня [2]. Стабильность железнодорожного пути во многом зависит от состояния балластной призмы. С наработкой тоннажа в щебеночном балласте появляются как внутренние засорители и загрязнители, образующиеся за счет дробления и истирания частиц, так и внешние засорители и загрязнители, образующиеся за счет просыпания и проливания перевозимых грузов (например, угольной пыли, мазута, локомотивного песка и т. д.) [3, 4]. На железных дорогах Российской Федерации уголь является одним из основных видов перевозимых грузов [5, 6]. В связи с этим балластный слой железнодорожного пути зачастую оказывается загрязненным угольной пылью. Такое загрязнение оказывает негативное влияние на прочностные, деформационные и фильтрационные свойства щебеночного балласта, что, в свою очередь, приводит к появлению отступлений геометрии рельсовой колеи в виде просядок, а также перекосам рельсовых нитей по уровню, величина которых зависит от степени загрязнения. Согласно [7, 8], отступления геометрии рельсовой колеи I, II степени могут быть устранены в плановом порядке, например при капитальном ремонте или среднем ремонте пути [9], отступления III и IV степени должны устраняться незамедлительно. Таким образом, для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации железнодорожного пути необходимо своевременное обслуживание балласта.

С учетом вышесказанного представляет интерес исследование процесса накопления остаточных деформаций в балластной призме в зависимости от степени ее загрязнения угольной пылью с наработкой тоннажа для прогнозирования срока службы балласта и своевременного назначения видов ремонтно-путевых работ, которые позволят избежать неисправностей, угрожающих безопасности движения поездов.

Состояние вопроса

В настоящее время существует множество математических моделей для расчета остаточных деформаций в щебеночном балласте в зависимости от циклов приложения нагрузки. В работе [10] перечислены некоторые из них. Большинство моделей разработано на основе лабораторных испытаний в приборах трехосного сжатия, которые позволяют наиболее приближенно к полевым условиям моделировать напряженное состояние щебеночного балласта. Самой распространенной математической моделью для расчета остаточной деформации является модель, разработанная J. E. Alva-Hurtado [11]:

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 (1 + \mu \log_{10} N), \quad (1)$$

где ε_N — остаточная вертикальная деформация щебеночного балласта после N циклов нагружения, д. е. (%);

ε_1 — остаточная деформация после первого цикла нагружения, д. е. (%);

μ — безразмерный коэффициент, определяющий интенсивность (скорость) накопления остаточной деформации;

N — количество циклов нагружения.

Полученная J. E. Alva-Hurtado формула (1) достаточно проста для практического применения, однако она не учитывает осевые нагрузки от подвижного состава и физико-механические свойства щебеночного балласта, что может привести к неточностям при вычислении остаточных деформаций в балласте.

В работе [12] А. Ф. Колос разработал математическую модель расчета накопленных остаточных деформаций в щебеночном балласте. Модель учитывает:

- физико-механические свойства щебня;
- эксплуатационные нагрузки на балластный слой, передаваемые от движущегося поезда.

Данная модель позволяет с наибольшей точностью прогнозировать накопление остаточных

деформаций под подошвой шпалы. Расчетное соотношение представлено в формуле (2).

$$S_N = \frac{X \left(\ln \left(\left| C e^{h\lambda} - D \right| \right) - \ln \left(\left| D - C \right| \right) - h\lambda \right)}{Y} - \frac{ADF}{Y} + \frac{AF}{D\lambda e^{h\lambda}}, \quad (2)$$

где $A = E_{tan}^1 R_f (\sigma_{z-0})^2$;

$$B = (E_{ur}^1 - E_{tan}^1) q_f \sigma_{z-0};$$

$$C = E_{tan}^1 E_{ur}^1 q_f;$$

$$D = E_{tan}^1 E_{ur}^1 R_f \sigma_{z-0};$$

$$F = 1 + \mu \log_{10} \left(\frac{10^6}{P_{oc}} T \right);$$

$$X = (BD + AC) F;$$

$$Y = D^2 \lambda;$$

E_{tan}^1 — тангенциальный (начальный) модуль деформации щебня при первичном нагружении, МПа;

R_f — коэффициент, учитывающий соотношение между q_f и q_{ult} , д. е.;

σ_{z-0} — вертикальные напряжения, действующие под подошвой шпалы при движении подвижного состава, МПа;

λ — коэффициент затухания вертикальных напряжений в балласте, 1/м;

h — толщина балластного слоя под шпалой, м;

E_{ur}^1 — модуль упругости щебня при первичном нагружении, МПа;

q_f — предельное значение девиатора напряжений, МПа;

q_{ult} — асимптотическое значение девиатора напряжений, МПа;

μ — коэффициент, учитывающий интенсивность (скорость) накопления остаточных деформаций;

P_{oc} — нагрузка на ось подвижного состава, тс/ось;

T — тоннаж, млн т брутто пропущенного груза.

Исходные физико-механические свойства щебеночного балласта, такие как E_{tan} , E_{ur} и q_f , могут быть достаточно точно выявлены в ходе трехосных испытаний, значения данных параметров для щебеночного балласта различных фракций можно найти в [12]. Коэффициент μ , входящий в формулу (2), необходимо определять на основе многофакторных экспериментов, так как значения данного показателя зависят от зернового состава щебня, а также степени загрязнения и засорения щебеночного балласта. В связи с отсутствием в зарубежной и отечественной литературе данных о коэффициенте μ , в настоящей работе выполнены циклические трехосные испытания с чистым и загрязненным угольной пылью щебеночным балластом. В ходе испытаний установлены численные значения коэффициента μ , на основании которых произведены расчеты и определены остаточные деформации в балластном слое железнодорожного пути с наработкой тоннажа.

Материалы для исследования

Для проведения исследования был выбран гранитный щебень II категории по ГОСТ 7392—2014 [13], так как данная категория является наиболее распространенной на железных дорогах России, а также в соответствии с [14] может применяться на железнодорожных линиях особогрузонапряженной категории. Зерновой состав гранитного щебня, используемого в исследованиях, приведен на рис. 1, а его основные показатели сведены в табл. 1. В качестве загрязнителя использовалась угольная пыль с фракцией менее 0,1 мм 100 % по массе.

Таблица 1. Основные характеристики зернового состава гранитного щебня, используемого в данном испытании

Материал	Фракция, мм	C_u	d_{50} , мм	C_c
Гранитный щебень	25–60	1,63	42	0,94

Программа испытаний и применяемое оборудование

Исследование интенсивности накопления остаточных деформаций в щебеночном балласте было выполнено с помощью прибора трехосного сжатия ГТ 1.3.7 производства ООО «НПП Геотек» (рис. 2) в лаборатории «Геотехнического научно-исследовательского испытательного центра» при кафедре «Строительство дорог транспортного комплекса» ПГУПС. Данная установка допускает боковое расширение грунта и позво-

ляет в лабораторных условиях создавать такое напряженное состояние щебеночного балласта, которое характерно для конструкции балластной призмы в полевых условиях под действием поездной нагрузки.

Для проведения циклических трехосных испытаний были подготовлены образцы из чистого гранитного щебня (предварительно увлажненные до влажности менее 1 %) и образцы, загрязненные угольной пылью в количестве 6 %, 12% и 18 % по массе (рис. 3, 4). Образцы щебня, загрязнен-

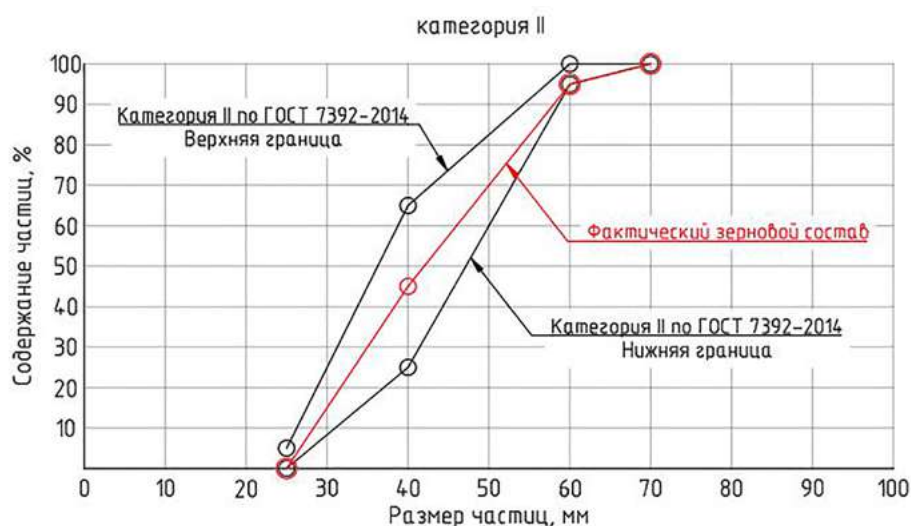


Рис. 1. Зерновой состав гранитного щебня, используемого в данном исследовании

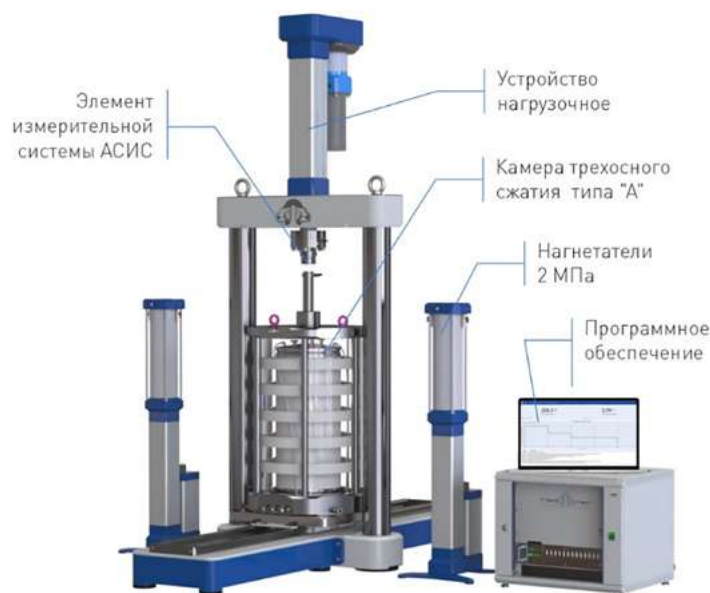


Рис. 2. Установка трехосного сжатия Д300*600 ГТ 1.3.7 для испытаний крупнообломочных грунтов



Рис. 3. Сборка образца из чистого щебня



Рис. 4. Сборка образца из загрязненного щебня угольной пылью

ные угольной пылью, были доведены до влажности 6 %. Перед началом проведения испытаний образцы из чистого щебня были уплотнены в камере прибора трехосного сжатия до плотности $1,67 \text{ г/см}^3$, а образцы из загрязненного щебня до плотности $1,71\text{--}1,90 \text{ г/см}^3$.

Суть проведения испытаний заключалась в следующем. К образцам, уложенным в камеру трехосного сжатия, прикладывалось всестороннее давление $\sigma_3 = 20 \text{ кПа}$, моделирующее нагрузку от рельсошпальной решетки и собственного веса щебня. Далее к образцу прикладывалась дополнительная вертикальная нагрузка $q = \sigma_1 - \sigma_3$ (девиаторное напряжение), моделирующая воздействие подвижного состава. Согласно расчетам [15], напряжения в балласте под шпалой σ_6 от движущегося подвижного состава с нагрузками 27 тс/ось при скорости $v = 90 \text{ км/ч}$ составляют 290 кПа.

С учетом вышеизложенного вертикальная нагрузка была принята равной $q = \sigma_1 - \sigma_3 = 290 \text{ кПа}$. После этого вертикальная нагрузка снижалась до значения 50 кПа и снова повторно прикладывалась (межпоездной интервал). Количество циклов приложения нагрузки составляло 30 раз для каждого образца, после чего испытание завершалось, поскольку по достижении 25–30-го цикла остаточные деформации составляли менее 2 % по сравнению с остаточными деформациями предыдущих циклов, что свидетельствовало о стабилизации образца. В ходе испытаний на каждом цикле фиксировались значения осевой деформации.

Обработка данных и результаты испытаний

Как отмечалось ранее, циклические трехосные испытания позволяют определять деформации, возникающие в образце после каждого цикла приложения нагрузки. Полная накопленная относительная вертикальная деформация образца ϵ_p при N -м количестве циклов нагружения будет определяться выражением:

$$\epsilon_p = \epsilon_p^1 + \epsilon_p^2 + \dots + \epsilon_p^N, \quad (3)$$

где ϵ_p^N — остаточная относительная деформация, возникающая на N -м цикле приложения нагрузки.

Преобразуем выражение (3) к виду:

$$\epsilon_p = \epsilon_p^1 \left(1 + \frac{\epsilon_p^2}{\epsilon_p^1} + \dots + \frac{\epsilon_p^N}{\epsilon_p^1} \right). \quad (4)$$

Выражение в скобках является функцией:

$$f(N) = \left(1 + \frac{\epsilon_p^2}{\epsilon_p^1} + \dots + \frac{\epsilon_p^N}{\epsilon_p^1} \right). \quad (5)$$

Согласно анализу, проведенному в работе [12], функцию $f(N)$ можно представить логарифмической зависимостью вида:

$$f(N) = (1 + \mu \log_{10} N). \quad (6)$$

Выражение (6) является линейной функцией вида $y = b + kx$. Отсюда следует, что $\log_{10} N$ — независимая переменная (где N — количество циклов приложения нагрузки), а коэффициент μ (характеризующий интенсивность накопления остаточных деформаций) является тангенсом угла наклона прямой линейной функции.

Значения коэффициента μ были получены в ходе регрессионного анализа, выполненного по данным циклических трехосных испытаний. Графики зависимости $f(N)$ от числа циклов приложения нагрузки для чистого и загрязненного щебня представлены на рис. 5, 6, а значения коэффициента μ приведены табл. 2.

Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что с увеличением процента загрязнения щебеночного балласта угольной пылью наблюдается рост значений коэффициента μ . Так, у щебеночного балласта с загрязнением угольной пылью в количестве 18 % по массе и влажностью 6 % коэффициент μ оказался в 1,5 раза выше, чем у чистого щебня. Это говорит о том, что процесс накопления остаточных деформаций в загрязненном балласте будет происходить как минимум в 1,5 раза интенсивнее.

На рис. 7 методом наименьших квадратов построена линейная регрессия, которая описывает зависимость коэффициента μ от процентного содержания по массе в щебеночном балласте загрязнителя (угольной пыли) m .

На основании полученных значений параметра μ произведен расчет накопленной осадки $S_{\text{ост}}$ в балластном слое в соответствии с формулой (2). Расчет выполнен с учетом наработки тоннажа 400 млн т брутто для четырехосного грузового полувагона с нагрузкой 27 т/ось, при толщине балластного слоя под шпалой 40 см. Параметры (R_f , λ и q_f), используемые при расчете, были приняты по данным [12]. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Данные из табл. 3 свидетельствуют о приросте остаточных деформаций в балласте с увеличением степени его загрязнения. Если у чистого щебня при наработке тоннажа 400 млн т брутто осадка составила 9 мм, то при его загрязнении угольной пылью 6 % по массе она увеличилась до 12 мм, при загрязнении 12 % по массе до 16 мм, а при загрязнении 18 % по массе до 26 мм. Это еще раз подтверждает влияние коэффициента μ на характер накопления остаточных деформаций в балластной призме при действии циклической нагрузки.

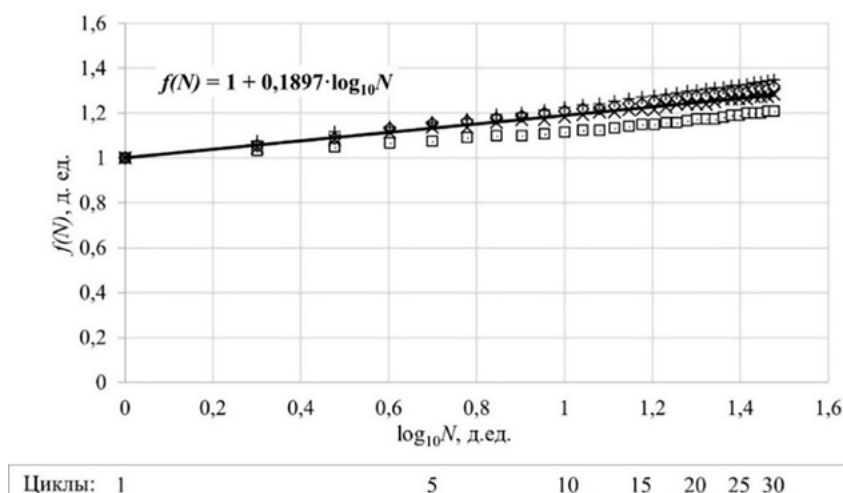
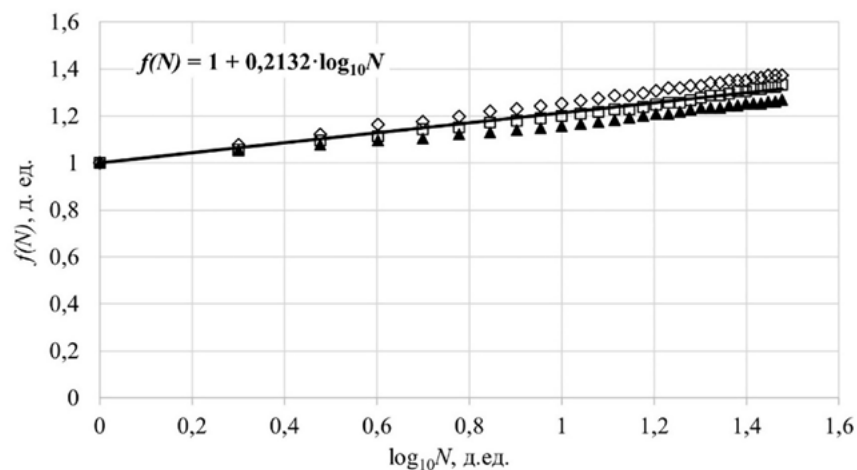


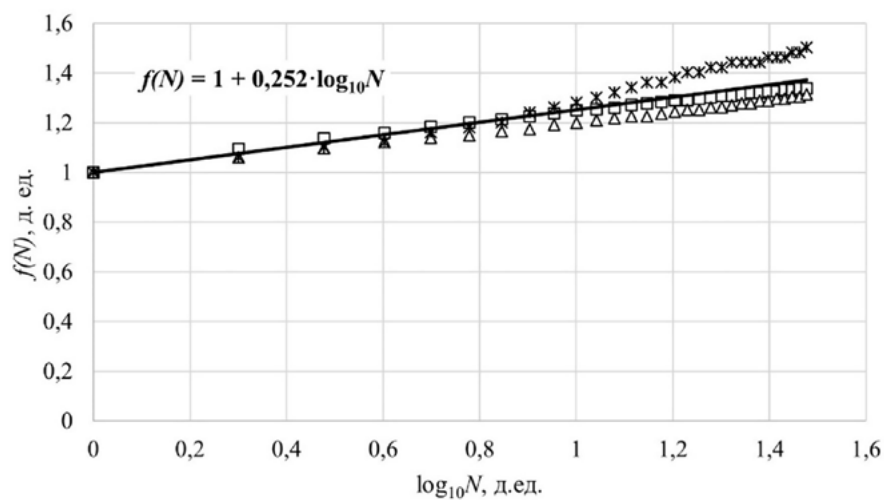
Рис. 5. Зависимость $f(N)$ от числа циклов приложения нагрузки для чистого щебня (на графике представлены серии испытаний)

а



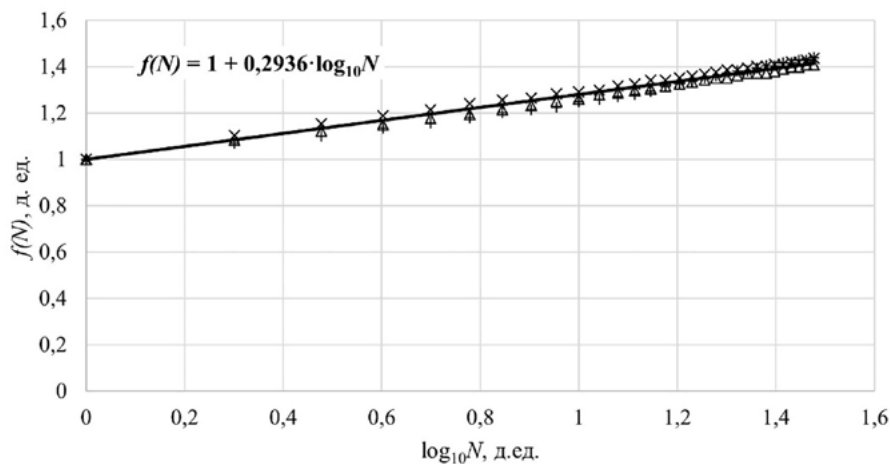
Циклы:	1	5	10	15	20	25	30
--------	---	---	----	----	----	----	----

б



Циклы:	1	5	10	15	20	25	30
--------	---	---	----	----	----	----	----

в



Циклы:	1	5	10	15	20	25	30
--------	---	---	----	----	----	----	----

Рис. 6. Зависимость $f(N)$ от числа циклов приложения нагрузки для загрязненного щебня: а — при содержании угольной пыли 6 % по массе с влажностью 6 %; б — при содержании угольной пыли 12 % по массе с влажностью 6 %; в — при содержании угольной пыли 18 % по массе с влажностью 6 % (на графике представлены серии испытаний)

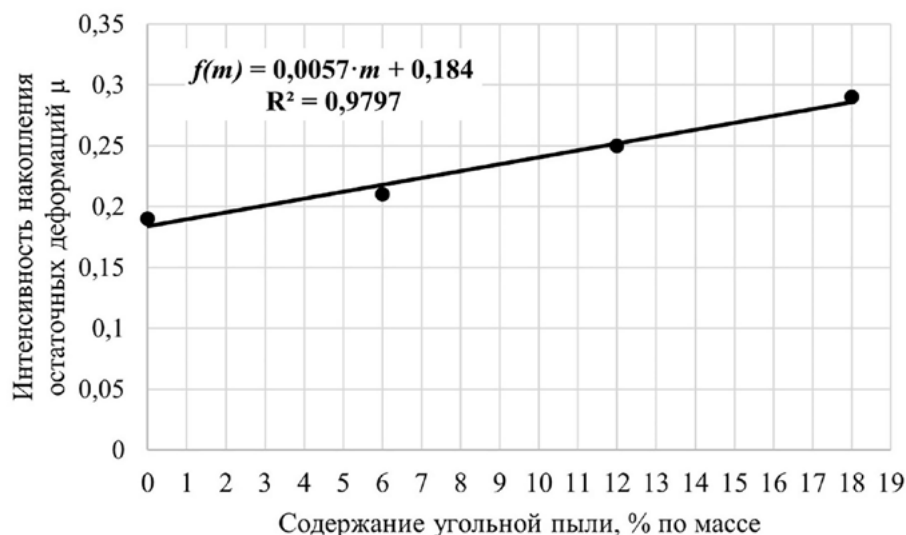


Рис. 7. Зависимость коэффициента μ от содержания угольной пыли в щебеночном балласте

Таблица 2. Значения коэффициента μ , определенные в результате исследования

Параметр	Чистый щебень (с влажностью до 1 %)	Загрязненный щебень (угольной пылью 6 % по массе) с влажностью 6 %	Загрязненный щебень (угольной пылью 12 % по массе) с влажностью 6 %	Загрязненный щебень (угольной пылью 18 % по массе) с влажностью 6 %
	Значение			
μ	0,19	0,21	0,25	0,29

Таблица 3. Результаты расчета накопленной осадки $S_{\text{ост}}$ в балластном слое при различных значениях коэффициента μ

Показатель	$\mu = 0,19$ (чистый щебень; w — до 1 %)	$\mu = 0,21$ (загрязненный щебень угольной пылью 6 % по массе; w — 6 %)	$\mu = 0,25$ (загрязненный щебень угольной пылью 12 % по массе; w — 6 %)	$\mu = 0,29$ (загрязненный щебень угольной пылью 18 % по массе; w — 6 %)
	Значение			
$S_{\text{ост}}, \text{мм}$	9	12	16	26

Где w — влажность образца щебеночного балласта.

Исходные данные для расчетов по формуле (2):

$E_{\text{тан}}^1 = 60 \text{ МПа}$, $E_{\text{ур}}^1 = 419 \text{ МПа}$ принято по результатам текущего исследования (для чистого щебня);

$E_{\text{тан}}^1 = 46 \text{ МПа}$, $E_{\text{ур}}^1 = 411 \text{ МПа}$ принято по результатам текущего исследования (при загрязнении углем 6 % по массе);

$E_{\text{тан}}^1 = 38 \text{ МПа}$, $E_{\text{ур}}^1 = 382 \text{ МПа}$ принято по результатам текущего исследования (при загрязнении углем 12 % по массе);

$E_{\text{тан}}^1 = 26 \text{ МПа}$, $E_{\text{ур}}^1 = 251 \text{ МПа}$ принято по результатам текущего исследования (при загрязнении углем 18 % по массе);

$R_f = 0,79 \text{ д. е.}$ (принято по данным [12]);

$\sigma_{z=0} = 0,29 \text{ МПа}$ (эквивалентно нагрузке 27 тс/ось при скорости движения подвижного состава 90 км/ч);

$\lambda = 1,21 \text{ 1/м}$ (принято по данным [12]);

$q_f = 330 \text{ кПа}$ (принято по данным [12]);

μ — принято по результатам текущего исследования;

$P_{\text{ос}} = 27 \text{ тс/ось}$;

$h = 0,40 \text{ м}$;

$T = 400 \text{ млн т}$ брутто

Заключение

В результате выполненных исследований были определены значения коэффициента μ , который учитывает темп развития осадок в бал-

ласте при наработке тоннажа, с учетом степени загрязнения щебня угольной пылью. Так, для чистого щебня значение коэффициента μ составляет 0,19, а для загрязненного щебня угольной

пылью в количестве 6 %, 12, 18 % по массе, с влажностью 6 % — 0,21, 0,25, 0,29 соответственно. Данный коэффициент применяется при расчетах остаточной деформации в балластной призме железнодорожного пути. Расчеты показали, что с увеличением загрязнения, которое сопровождается ростом коэффициента μ , осадка железнодорожного пути может происходить в 1,5–2,8 раза быстрее. На основе экспериментальных данных получена линейная зависимость коэффициента μ от содержания угольной пыли в щебеночном балласте.

Таким образом, можно заключить, что для поддержания надежной и стабильной работы железнодорожного пути необходимо осуществлять регулярный мониторинг состояния балластного слоя. Это позволит своевременно назначать необходимые мероприятия по техническому обслуживанию пути и предотвращать ускоренное накопление остаточных деформаций.

Список источников

1. Кузьмина Н. А. Исследование влияния движения поездов повышенной массы и длины как элемента увеличения эффективности перевозочного процесса / Н. А. Кузьмина // Евразийское научное объединение. — 2020. — № 1-1(59). — С. 45–50. — DOI: 10.5281/zenodo.3662107.
2. Горьканова Т. Н. Повышение стабильности щебеночного балласта / Т. Н. Горьканова // Путь и путевое хозяйство. — 2010. — № 2. — С. 22–24.
3. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути / С. Н. Попов. — М.: Транспорт, 1965. — 183 с.
4. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 558–575. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575.
5. Такайшвили Л. Н. Восточный полигон железных дорог России для экспорта российского угля: перспективы развития и ограничения / Л. Н. Такайшвили // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 12. — С. 41–55. — DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502.
6. Хусаинов Ф. И. Перевозки угля и нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: текущее состояние и перспективы / Ф. И. Хусаинов, М. В. Ожерельева // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2019. — № 4(83).
7. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов: утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 28 февраля 2020 г. № 436/р (в редакции от 9 ноября 2020 г. с изм. от 1 апреля 2021 г.).
8. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288/р. — М.: ОАО «РЖД», 2016. — 286 с.
9. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути: утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 17 ноября 2021 г. № 2888/р.
10. Abadi T. A Review and Evaluation of Ballast Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF) / T. Abadi, L. Le Pen, A. Zervos, W. Powrie // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 143. — Pp. 999–1006.
11. Alva-Hurtado J. E. Permanent Strain Behaviour of Railroad Ballast / J. E. Alva-Hurtado, E. T. Selig // Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — Stockholm: Balkema, 1981. — Vol. 1. — Pp. 543–546.
12. Колос А. Ф. Несущая способность и деформируемость балластного слоя при эксплуатации железнодорожного пути: дис. ... д-ра техн. наук / А. Ф. Колос. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. — 637 с.
13. ГОСТ 7392—2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.
14. СП 119.13330.2024. СНиП 32-01—95. Железные дороги колеи 1520 мм. — 2024.
15. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утверж-

дена Распоряжением ОАО «РЖД» № 2706/р от 22 декабря 2017 г. — М.: ОАО «РЖД». — 97 с.

Дата поступления: 04.11.2025

Решение о публикации: 29.11.2025

Контактная информация:

КАЧАЛКИН Андрей Вячеславович — аспирант;
andrew.kachalkin1999@mail.ru

КОЛОС Алексей Федорович — д-р техн. наук, проф.;
kolos2004@inbox.ru

Determining the Degree of Residual Deformation Accumulation in the Ballast Prism of a Railway Track by Analysing the Intensity of Ballast Gravel Contamination with Coal Dust

A. V. Kachalkin, A. F. Kolos

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

For citation: Kachalkin A. V., Kolos A. F. Determining the Degree of Residual Deformation Accumulation in the Ballast Prism of a Railway Track by Analysing the Intensity of Ballast Gravel Contamination with Coal Dust // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 869–879. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-869-879

Summary

Purpose: To assess the rate of residual deformation accumulation in the ballast prism in relation to the degree of contamination by coal dust. **Methods:** The accumulation rate of residual deformations was quantified using the coefficient μ , derived from cyclic triaxial tests conducted within the GT 1.3.7 triaxial compression apparatus and subsequent regression analysis. **Results:** Laboratory tests and regression analysis have yielded values for the coefficient μ that indicated the intensity (rate) of residual deformation accumulation in the ballast prism. The investigations have been conducted on both clean stone ballast and ballast contaminated with coal dust at a moisture level of 6%. The findings demonstrate that as the percentage of coal dust contamination in the ballast increases, the rate of residual deformation accumulation intensifies by 1.5 times. With the values obtained for the coefficient μ , it was possible to calculate the ballast prism residual deformation. These calculations considered a tonnage of 400 million gross tons and were based on the premise that the bearing capacity of the formation is maintained, with track settlement occurring solely due to the deformations of the ballast prism. **Practical significance:** The results of the research allow for the forecasting of residual deformation accumulation in ballast stone as tonnage increases, particularly in relation to the level of contamination with coal dust. Consequently, this analysis enables the prediction of the ballast stone's service life and the formulation of strategies for the technical maintenance of the railway track aimed at preventing deviations in the geometry of track grades III and IV.

Keywords: Railway track, ballast layer, coal dust, residual deformation, triaxial tests, stone ballast, track settlement, contamination degree.

References

1. Kuz'mina N. A. Issledovanie vliyaniya dvizheniya poezdov povyshennoy massy i dliny kak elementa uvelicheniya effektivnosti perevozochnogo protsessa [Study of the impact of heavy-

haul and long-train operations as an element of increasing transportation efficiency]. *Evraziyskoe Nauchnoe Ob"edinenie* [Eurasian Scientific Association]. 2020, Iss. 1-1(59), pp. 45–50. DOI: 10.5281/zenodo.3662107. (In Russian)

2. Gor'kanova T. N. Povyshenie stabil'nosti shchebenochnogo ballasta [Improving the stability of crushed stone ballast]. *Put'i putevye khozyaystvo* [Track and Track Facilities]. 2010, Iss. 2, pp. 22–24. (In Russian)
3. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of railway track]. Moscow: Transport Publ., 1965, 183 p. (In Russian)
4. Kolos A. F. Zasorenie i zagryaznenie shchebenochnogo ballasta pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Contamination and pollution of crushed stone ballast during railway track operation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 558–575. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575. (In Russian)
5. Takayshvili L. N. Vostochnyy poligon zheleznikh dorog Rossii dlya eksporta rossiyskogo uglya: perspektivy razvitiya i ogranicheniya [Eastern polygon of Russian railways for Russian coal export: development prospects and constraints]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2023, vol. 334, Iss. 12, pp. 41–55. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502. (In Russian)
6. Khusainov F. I., Ozherel'eva M. V. Perevozki uglya i neftenalivnykh грузов zheleznodorozhnym transportom: tekushchee sostoyanie i perspektivy [Rail transportation of coal and oil cargo: current state and prospects]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics]. 2019, Iss. 4(83). (In Russian)
7. *Instruktsiya po otsenke sostoyaniya rel'sovoy kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov: utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 28 fevralya 2020 g. № 436/r (v redaktsii ot 9 noyabrya 2020 g. s izm. ot 1 aprelya 2021 g.)* [Instruction on assessing the condition of the rail track using track measuring devices and measures to ensure train traffic safety: approved by Order of JSC "RZD" No. 436/r dated February 28, 2020 (as amended on November 9, 2020, with changes from April 1, 2021)]. (In Russian)
8. *Instruktsiya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti: utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 14 noyabrya 2016 g. № 2288/r* [Instruction on current maintenance of railway track: approved by Order of JSC "RZD" No. 2288/r dated November 14, 2016]. Moscow: OAO "RZHD" Publ., 2016, 286 p. (In Russian)
9. *Pravila naznacheniya remontov zheleznodorozhnogo puti: utverzhdeny Rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 17 noyabrya 2021 g. № 2888/r* [Rules for scheduling railway track repairs: approved by Order of JSC "RZD" No. 2888/r dated November 17, 2021]. (In Russian)
10. Abadi T., Le Pen L., Zervos A., Powrie W. A Review and Evaluation of Ballast Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF). *Procedia Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 999–1006.
11. Alva-Hurtado J. E., Selig E. T. Permanent Strain Behaviour of Railroad Ballast. *Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm: Balkema, 1981, vol. 1, pp. 543–546.
12. Kolos A. F. *Nesushchaya sposobnost' i deformiruemost' ballastnogo sloya pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Load-bearing capacity and deformability of ballast layer during railway track operation: Dr. Tech. Sci. diss.]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2024, 637 p. (In Russian)
13. *GOST 7392—2014. Shcheben' iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya* [Crushed stone from dense rocks for railway track ballast layer. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 32 p. (In Russian)
14. *SP 119.13330.2024. SNiP 32-01—95. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm* [Railways of 1520 mm gauge]. 2024. (In Russian)
15. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti: utverzhdena Rasporyazheniem OAO "RZHD" № 2706/r ot 22 dekabrya 2017 g.* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on track under reliability conditions: approved by Order of JSC "RZD" No. 2706/r dated December 22, 2017]. Moscow: OAO "RZHD" Publ., 2017, 97 p. (In Russian)

Received: November 04, 2025

Accepted: November 29, 2025

Author's information:

Andrey V. KACHALKIN — Postgraduate Student;
andrew.kachalkin1999@mail.ru

Aleksey F. KOLOS — Dr. Sci. in Engineering, Professor;
kolos2004@inbox.ru

УДК 629.423.25

Анализ эффективности использования тормозных средств тепловозов в эксплуатации

В. Ф. Танаев

ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 107174, Москва, ул. Новая Басманная, 2/1, стр. 1

Для цитирования: Танаев В. Ф. Анализ эффективности использования тормозных средств тепловозов в эксплуатации // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 880–894. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-880-894

Аннотация

Цель: Комплект тормозного оборудования современного грузового тепловоза с электрической передачей включает автоматический прямодействующий тормоз для управления пневматическим тормозным оборудованием состава поезда и локомотива, прямодействующий неавтоматический тормоз локомотива, электродинамический реостатный тормоз. Целью работы является сравнительный анализ эффективности использования разных видов тормозных средств тепловозов в процессе эксплуатации и определение способов их повышения. **Методы:** В работе использовался статистический анализ данных современных локомотивных систем регистрации, выполнялись расчеты нагрева и ослабления посадки бандажей при длительном торможении. **Результаты:** В результате анализа данных удаленного мониторинга параметров силовой установки тепловозов 2ТЭ25КМ, эксплуатируемых на полигоне Октябрьской, Московской и Северной ж. д., установлено, что более чем 83 % циклов регулировочных торможений выполняются с использованием колодочных пневматических тормозов состава и локомотива, при этом отпуск вспомогательного тормоза локомотива при торможении автоматическим прямодействующим тормозом не производится, в результате тормозные колодки и бандажи колесных пар тепловозов используются для торможения поездов. Реостатный тормоз тепловозов применяется менее чем в 17 % циклов торможений, хотя его характеристики позволяют полностью исключить использование прямодействующего автоматического тормоза и на 60 % уменьшить использование вспомогательного тормоза локомотива при скоростях выше 10 км/ч. **Практическая значимость:** Для повышения эффективности применения реостатного тормоза на тепловозах необходима доработка системы управления им с целью сохранения у локомотивных бригад стереотипов приемов управления тормозами в пути следования.

Ключевые слова: Реостатный тормоз, прямодействующий автоматический тормоз, вспомогательный тормоз локомотива, цикл торможения, тормозная сила, тормозная мощность.

Введение

Комплект тормозного оборудования современного грузового тепловоза с электрической передачей включает автоматический прямодействующий тормоз для управления пневматическим тормозным оборудованием состава поезда и локомотива (управление осуществляется с помощью крана машиниста усл. № 395 или усл. № 130 [1]),

прямодействующий неавтоматический тормоз локомотива (управление осуществляется с помощью крана вспомогательного тормоза усл. № 254, усл. № 215 или усл. № 224Д [2]), электродинамический реостатный тормоз (управление осуществляется с помощью контроллера машиниста [3]). При следовании с поездом реостатный тормоз может применяться только на локомотиве или

совместно с автоматическими тормозами состава поезда (комбинированное торможение).

Порядок управления пневматическими тормозами (ПТ) состава поезда и локомотива регламентируется Правилами технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава, утвержденными приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 3 июня 2014 г. № 151 [4]. Порядок применения электрического и рекуперативного торможения (РТ) определяется Инструкцией о порядке применения электрического (реостатного, рекуперативного) тормоза при следовании с поездом, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 21 ноября 2024 г. № 2883/р [5].

Непрерывное повышение массы поезда в рамках развития тяжеловесного движения, предусмотренного как Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. [6], так и Стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. (белая книга) [7], требует совершенствования приемов управления тормозами поездов повышенной массы, прежде всего в части совместного использования разных видов тормозов, с целью повышения уровня безопасности движения, надежности тягового привода локомотива и точности поддержания заданной скорости движения как в ручном, так и в автоматическом режиме управления поездом.

Последняя задача приобретает особое значение при работе в составе пакетов поездов при использовании современных технологий интервального и координатного регулирования движения [8], поскольку точность поддержания скорости движения ведомых поездов в режиме торможения на участках пути с ограничением скорости движения в этом случае во многом определяет величину межпоездного интервала и пропускную способность участка.

На электровозах эффективность использования оборудования рекуперативного тормоза может быть объективно оценена по количеству рекуперированной энергии. Оно является одним из показателей качества функционирования эксплуатационного депо, в связи с чем применение этого вида торможения локомотивными бригадами контролируется и всячески поощряется руководством. Навыки и стереотипы применения рекуперативного торможения у большинства локомотивных бригад способствуют регулярному применению ими также и реостатного торможения при отсутствии возможностей для рекуперации.

На тепловозах необходимость и целесообразность применения РТ в настоящее время определяется машинистом в пути следования. Время и интенсивность использования РТ никем не контролируется и никак не влияет на оценку работы ни локомотивных бригад, ни эксплуатационных депо.

В связи с этим актуальными являются задачи, во-первых, оценки эффективности использования дорогостоящего оборудования реостатного тормоза, которое устанавливается в настоящее время на все выпускаемые тепловозы, и, во-вторых, определения путей ее повышения.

Выбор способа решения поставленных задач

Предварительный анализ данных регистрации тепловозов 2ТЭ116У и 2ТЭ25КМ, принадлежащих компании ОАО «РЖД», показал, что на этих тепловозах РТ в процессе эксплуатации практически не используется.

На тепловозах 2ТЭ116У часть тормозного оборудования, вплоть до тормозных переключателей, снята со многих секций, а системы РТ, как правило, не восстанавливают работоспособность.

Срок эксплуатации парка тепловозов 2ТЭ25КМ существенно меньше, чем у 2ТЭ116У. Все эти тепловозы эксплуатируются по контракту жизненного цикла; часть из них еще находится

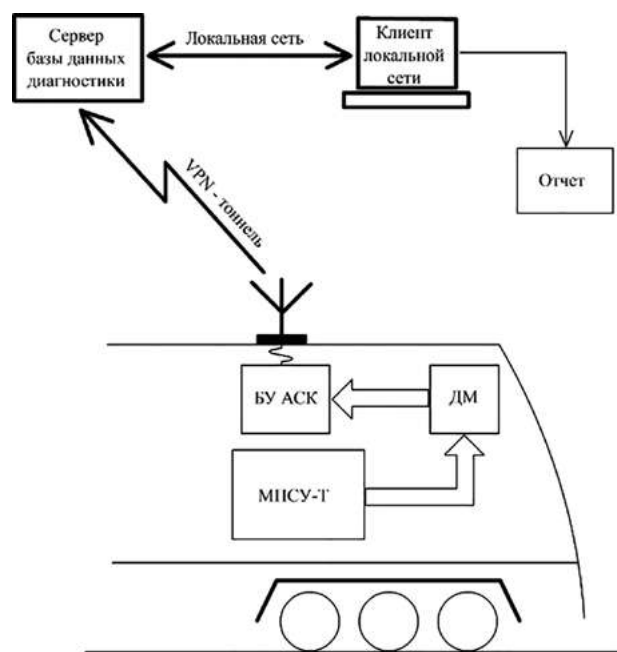


Рис. 1. Схема формирования массива данных для анализа эффективности использования тормозных средств тепловоза

на заводской гарантии в рамках этого контракта. Поэтому оборудование РТ на большинстве локомотивов поддерживается в исправном состоянии.

В связи с этим для анализа особенностей применения РТ на тепловозах использовались данные подсистем диагностики бортовых микропроцессорных систем управления МПСУ-Т тепловозов серии 2ТЭ25КМ одного из частных операторов,

работающего на инфраструктуре Октябрьской, Московской и Северной железных дорог.

В процессе работы тепловоза пакет диагностической информации от устройства индикации (пультового дисплейного модуля) системы МПСУ-Т с дискретностью 1 выборка/с передается в блок управления автоматической системы контроля (АСК). Каждые 300 с АСК отправляет накопленные данные на удаленный сервер (рис. 1) [9, 10].

Перечень параметров, использовавшихся при анализе работы тормозной системы тепловоза, приведен в табл. 1.

Выборка данных за период с 1 января 2025 г. по 18 июня 2025 г. для восьми тепловозов серии 2ТЭ25КМ осуществлялась из базы данных на сервере, в которую загружаются данные, принимаемые от систем АСК локомотивов.

На первом этапе обработки данных, полученных с тепловоза, выполнялась их разметка. В ходе разметки идентифицировались следующие режимы:

- торможение поезда прямодействующим автоматическим тормозом;
- торможение локомотива прямодействующим неавтоматическим (вспомогательным) тормозом;

Таблица 1. Перечень параметров тормозной системы и электрической передачи тепловоза 2ТЭ25КМ

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение в формулах	Единицы измерения в МПСУ-Т	Пределы изменения
1	Дата/время измерения	t	с	
2	Давление в тормозном цилиндре тележки 1	$p_{тц1}$	кг/см ²	0–6
3	Давление в тормозном цилиндре тележки 2	$p_{тц2}$	кг/см ²	0–6
4	Давление в тормозной магистрали	$p_{тм}$	кг/см ²	0–16
5	Давление в главном резервуаре	$p_{гр}$	кг/см ²	0–16
6	Ток возбуждения тягового двигателя в режиме РТ	$I_{втэд}$	А	0–1500
7	Ток якоря первого тягового двигателя в режиме РТ	$I_{ятэд1}$	А	
8	Режим работы	r	—	1–5
9	Позиция контроллера	$p_{км}$	—	0–15
10	Скорость тепловоза по данным МПСУ-Т	$V_{мпсу}$	км/ч	0–100

- отпуск тормоза локомотива в условиях заторможенного поезда (с использованием прямодействующего автоматического тормоза);
- торможение реостатным тормозом.

Все режимы анализировались при скоростях свыше 10 км/ч, поскольку на меньших скоростях применение реостатного торможения технически нецелесообразно.

Далее по результатам разметки исходной выборки для каждого месяца указанного периода формировались массивы данных по каждому циклу торможения:

- поездным тормозом;
- вспомогательным тормозом локомотива;
- отпуском тормоза локомотива при заторможенном поездном тормозе;
- реостатным торможением.

Исходя из параметров тормозной системы тепловоза, для каждого цикла торможения колодочными тормозами определялась работа тормозной силы, действующей на колесо и на локомотив в целом, средняя тормозная мощность локомотива за цикл торможения, выполнялась оценка повышения температуры нагрева бандажа вследствие трения колодок и связанного с этим уменьшения натяга в соединении «бандаж — колесный центр». Для каждого цикла торможения реостатным тормозом определялась работа всех тяговых двигателей (ТЭД) и средняя тормозная мощность тепловоза.

Обсуждение результатов

На рис. 2 приведена информация о количестве циклов торможения тепловоза 2ТЭ25КМ в процессе работы с грузовыми поездами на полигонах Московской, Октябрьской и Северной железных дорог филиалов ОАО «РЖД» в течение первого полугодия 2025 г.

Как следует из рисунка, для выполнения регулировочных торможений в пути следования при скоростях движения более 10 км/ч регулярно

используется вспомогательный пневматический тормоз локомотива. Из результатов анализа данных о скорости начала торможения вспомогательным тормозом и ее изменении в результате торможения, представленных на рис. 3 и 4, следует, что используется он не только для коррекции состояния состава при следовании по перевалистому профилю, но и (в 25 % циклов торможения вспомогательным тормозом) для регулировочных торможений поездов при скорости более 25 км/ч со снижением ее 5 км/ч и больше без применения тормозов состава, причем, как следует из рис. 2, в среднем даже чаще, чем автоматические прямодействующие тормоза вагонов.

При торможении поездным тормозом вспомогательный тормоз локомотива машинисты не отпускают, несмотря на наличие специальной кнопки отпуска вспомогательного тормоза «КОТ» на тепловозах этой серии.

В результате интенсивность использования тормоза локомотива для регулирования скорости движения поездов существенно превосходит интенсивность использования тормозов вагонов. Помимо износа колодок, продолжительные торможения локомотивным тормозом при движении с повышенными скоростями приводят к увеличению температуры нагрева бандажей колес локомотива и уменьшению вследствие этого натяга в соединении «бандаж — колесный центр». Расчет параметров циклов торможения, вызывающих опасное уменьшение натяга, приведен в табл. 2. Следствиями такого использования тормозных средств локомотивов являются увеличение эксплуатационных расходов ОАО «РЖД» (увеличение расхода тормозных колодок и сокращение ресурса бандажей колесных пар) и снижение доходов за счет роста простоев локомотивов в ремонтах при сменах и обточках бандажей колесных пар.

Основными причинами применения вспомогательного тормоза локомотива для выполнения

регулируемых торможений поездов является его высокое быстродействие, минимальный разброс тормозных характеристик и, как следствие, хорошая управляемость, одним из признаков которой является однозначное соответствие реакции системы (тормозной силы) на управляющее воздействие (положение рукоятки крана вспомогательного тормоза).

Практически такими же свойствами обладает реостатный тормоз, однако, как следует из рис. 2, используется он значительно реже пневматических колодочных тормозов либо не используется

вообще. Суммарная работа тормозной силы колодочных тормозов двухсекционного локомотива, преобразуемая в износ колодок и нагрев бандажей колесных пар, превышает суммарную работу тормозной силы при электрическом торможении за тот же период эксплуатации в 4–7 раз (рис. 5).

При этом, как следует из рис. 6, максимальная тормозная мощность, реализуемая колодочными видами тормозов двухсекционного тепловоза, составляет не более 60 % от реализуемой мощности электрического тормоза, которая, в свою очередь, не превышает 86 % от его номинальной

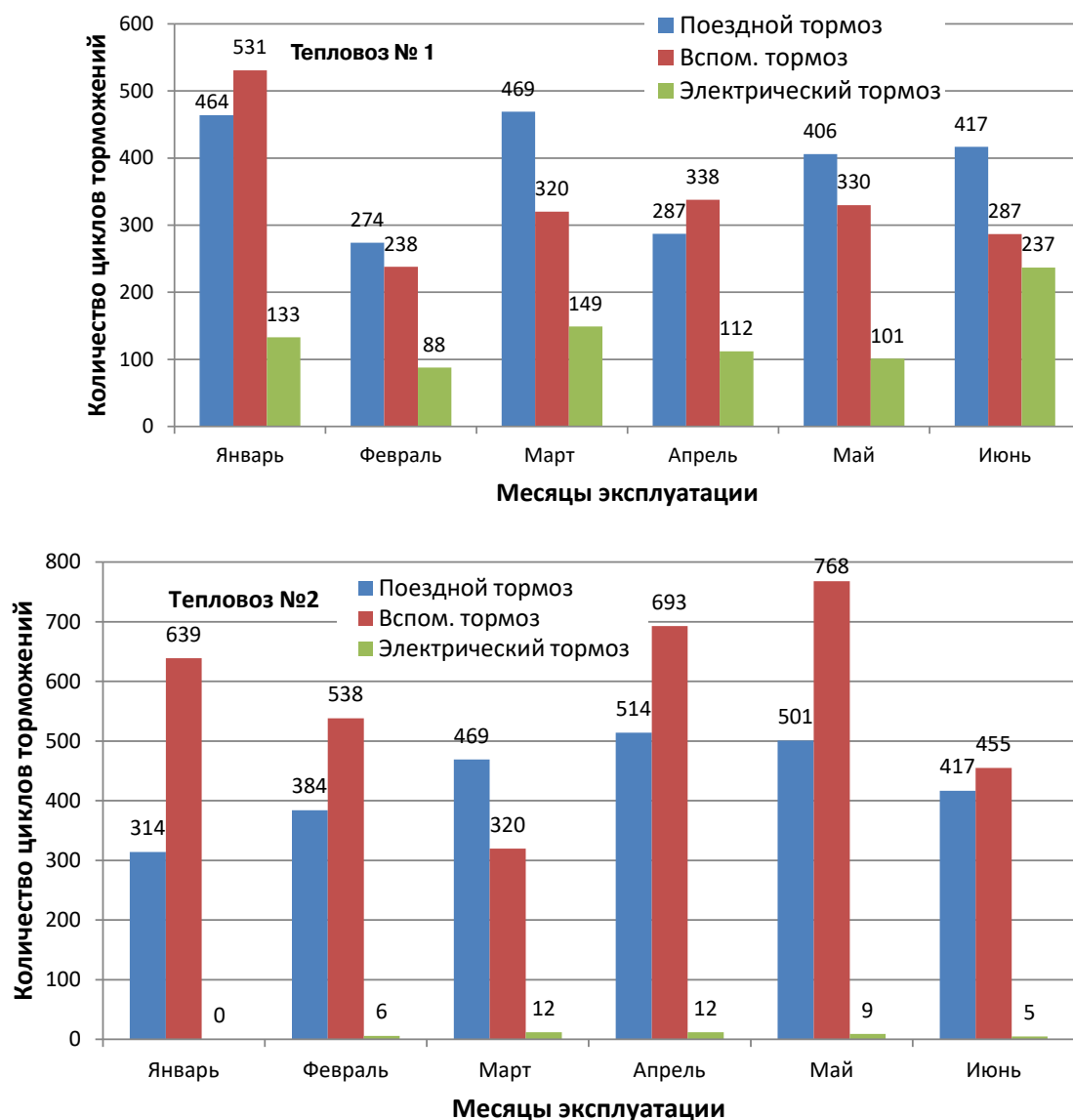


Рис. 2. Использование разных видов тормозов на двух тепловозах 2ТЭ25КМ

Таблица 2. Циклы торможения вспомогательным тормозом с опасным уменьшением натяга в соединении «бандаж — колесный центр»

№ тормо- жения	$t_{\text{торм}},$ с	$p_{\text{тц max}},$ МПа	$V_1,$ км/ч	$V_2,$ км/ч	$E_{\text{торм.кол}},$ кДж	$P_{\text{торм.ср}},$ кВт	Изм. натяга банд., мм	Темп. нагрева банд., С	Вес поезда, т
1	113	0,187	26	15	4643,0	986,1	0,520	52,5	6039
2	114	0,198	20	11	4435,3	933,7	0,506	51,1	5461
3	80	0,195	38	33	4637,7	1391,3	0,520	52,5	6030
4	80	0,211	53	61	6947,2	2084,1		68,7	6030
5	93	0,144	57	32	4638,0	1196,9	020	52,5	0
6	83	0,125	40	58	5038,8	1456,9	0,548	55,3	6053
7	74	0,195	70	41	5946,4	1928,5	0,611	61,7	1749
8	84	0,148	59	56	6523,7	1863,9	0,651	65,7	1763
9	74	0,193	60	58	6039,3	1958,6	0,617	62,3	1763
10	130	0,174	48	46	9213,2	1700,9	0,838	84,6	1763
11	56	0,188	61	56	5050,8	2164,6	0,548	55,4	1763
12	81	0,204	63	60	7617,7	2257,1	0,727	73,4	1763
13	86	0,146	59	57	6562,3	1831,3	0,653	66,0	1763
14	96	0,215	82	24	7955,3	1988,8	0,750	75,8	0
15	63	0,211	65	25	4941,5	1882,5	0,541	54,6	0
16	78	0,169	55	37	5244,4	1613,6	0,562	56,8	6010
17	123	0,210	25	11	5662,7	1104,9	0,591	59,7	6009
18	173	0,113	24	11	4749,9	658,9	0,527	53,3	0

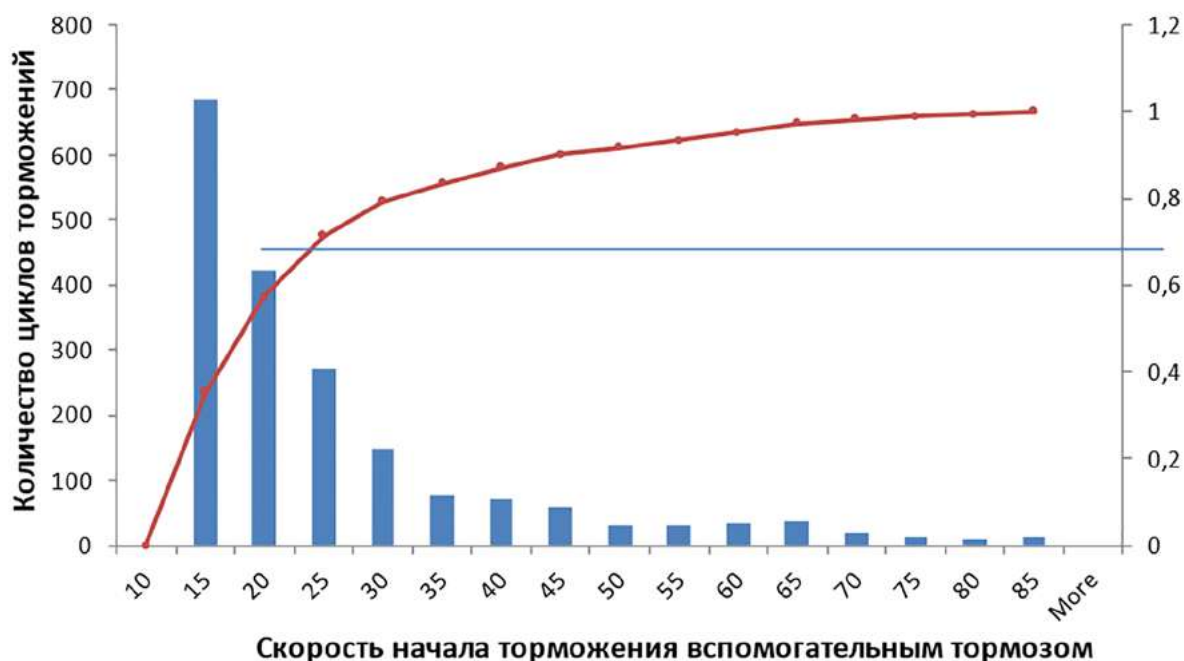


Рис. 3. Группированный ряд значений скорости начала торможения вспомогательным тормозом тепловоза № 1 за шесть месяцев 2025 г.

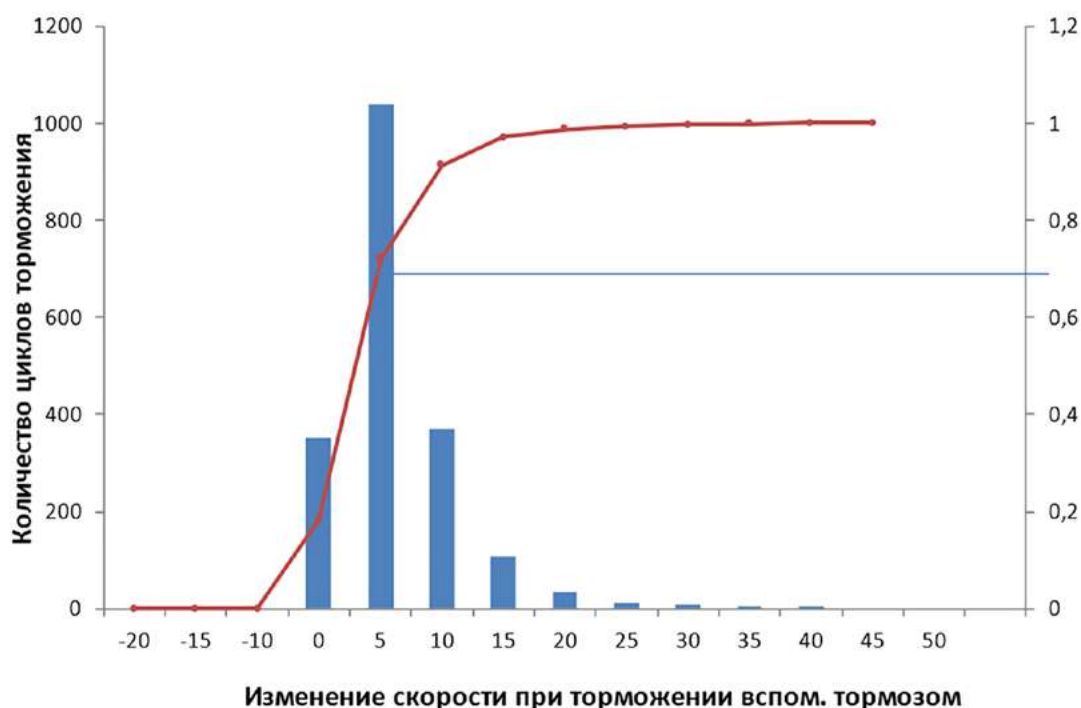


Рис. 4. Группированный статистический ряд изменения скорости при торможении вспомогательным тормозом тепловоза № 2 за шесть месяцев 2025 г.

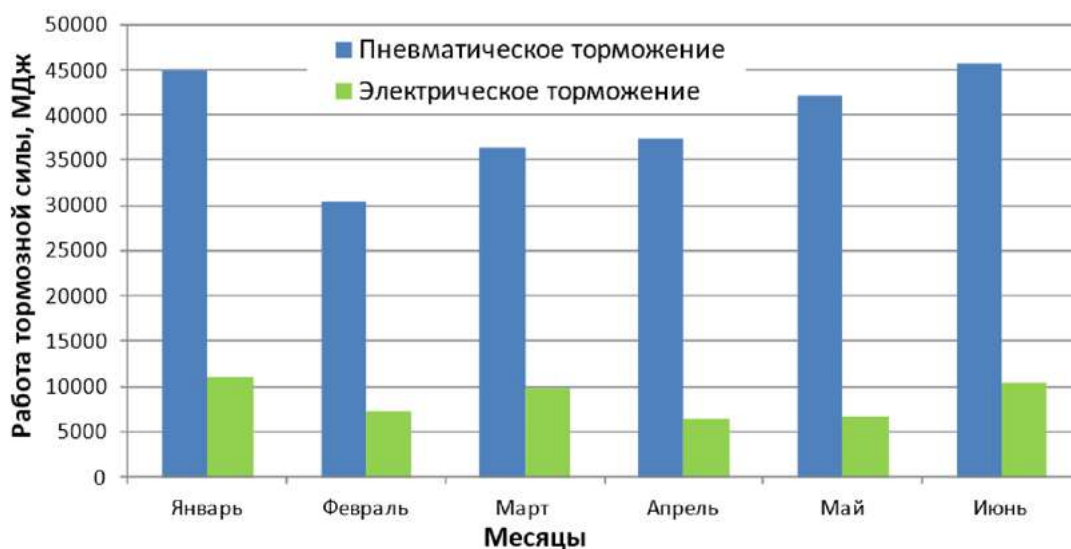


Рис. 5. Суммарная работа тормозных сил пневматических колодочных тормозов и электрического тормоза двух тепловозов

мощности (для тепловоза 2ТЭ25КМ — не менее 5700 кВт [5]). Следовательно, во всех случаях применения пневматического тормоза локомотива в указанный период при скоростях свыше 10 км/ч его можно было заменить электрическим тормозом без потери тормозной эффективности.

Таким образом, при рациональном и эффективном использовании серийного оборудования реостатного тормоза тепловоза 2ТЭ25КМ применение вспомогательного пневматического тормоза локомотива при скоростях свыше 10 км/ч (а при использовании современных систем рео-

статного торможения [11] — при всех скоростях, вплоть до остановки) может быть полностью исключено. Это позволит в разы сократить расход тормозных колодок и увеличить ресурс бандажей колесных пар.

Как показывают результаты опросов машинистов, основной причиной отказа от использования реостатного торможения являются:

- отсутствие подробного регламента применения РТ; если в Правилах технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава [4] подробно описана технология применения пневматических и электропневматических тормозов при работе с поездами разной массы и длины, Инструкцией о порядке применения электрического (реостатного, рекуперативного) тормоза при следовании с поездом [5] устанавливаются преимущественно общие требования к процессу управления тормозом, многие из которых носят рекомендательный характер;

- необходимость выполнения дополнительных, отличных от стереотипных, операций по управлению тормозами;

- отсутствие необходимой квалификации у локомотивных бригад тепловозов (отсутствие навыков управления реостатным тормозом, недостаточное представление о принципах действия тормоза, тормозных характеристиках локомотива и приемах его применения);

- отсутствие уверенности в надежности работы электрических цепей управления силовыми аппаратами локомотива (в гарантированном восстановлении схемы тягового режима после выхода из режима торможения);

- опасение возникновения избыточных продольно-динамических реакций в составе поезда и вызванных ими нарушений в работе приборов пневматического торможения, прежде всего воздухораспределителей, следствием которых будет

самопроизвольное срабатывание пневматических тормозов состава;

- перерасход топлива вследствие работы дизеля с повышенной частотой вращения в период торможения.

Анализ тормозных характеристик теплового 2ТЭ25КМ (рис. 7) [13] показывает, что электрический тормоз при соответствующем управлении током возбуждения ТЭД в режиме торможения может использоваться в качестве полноценной замены вспомогательному тормозу локомотива в диапазоне скоростей движения от 90 до 25 км/ч даже при максимальном давлении в тормозных цилиндрах (0,42 МПа). Поскольку в процессе реальной эксплуатации торможение с максимальным (0,42 МПа) давлением в ТЦ практически никогда не применяется (рис. 8), можно констатировать возможность полноценного замещения вспомогательного пневматического тормоза локомотива при скоростях движения от 100 до 10–25 км/ч (в зависимости от положения рукоятки крана вспомогательного тормоза), после чего должен выполняться переход на пневматическое торможение.

Такое замещение позволит полностью исключить колодочное торможение локомотива при использовании поездного тормоза и не менее чем на 60 % уменьшить количество циклов регулирующего торможения вспомогательным тормозом при скоростях движения более 10 км/ч.

Для исключения нарушения стереотипа действий машинистов при торможении управление как пневматическим, так и реостатным тормозом должно осуществляться изменением положения рукоятки крана вспомогательного тормоза при торможении одиночного локомотива и изменением положения рукоятки поездного крана машиниста при торможении поезда (пневматическими тормозами состава и реостатным тормозом локомотива).

Выбор вида торможения должен осуществляться автоматически в зависимости от скоро-

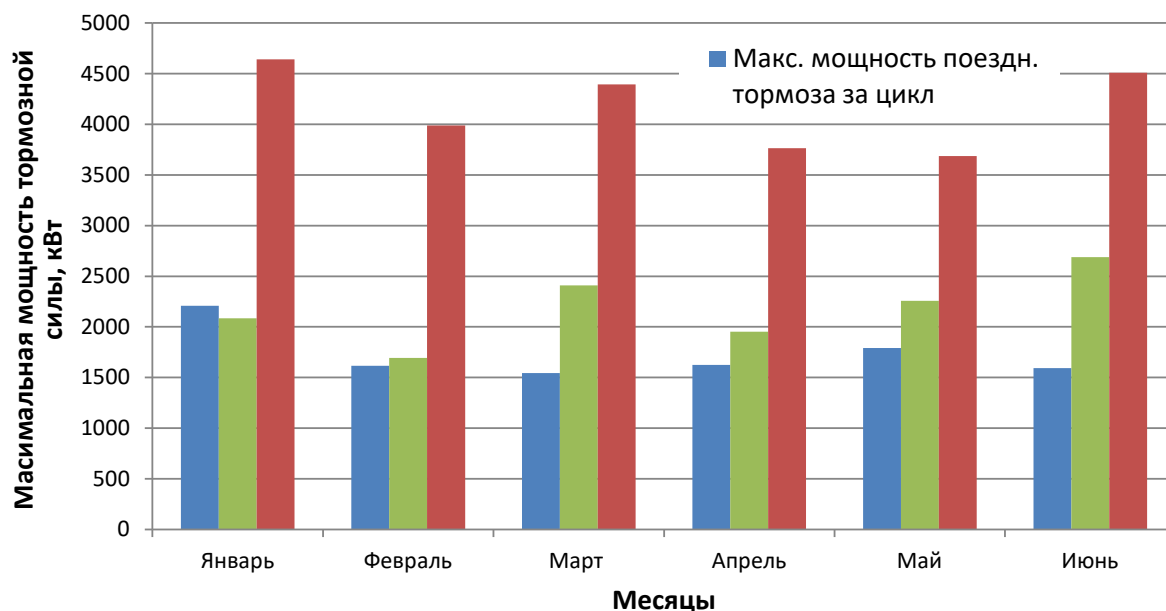


Рис. 6. Максимальная тормозная мощность, реализуемая разными видами тормоза

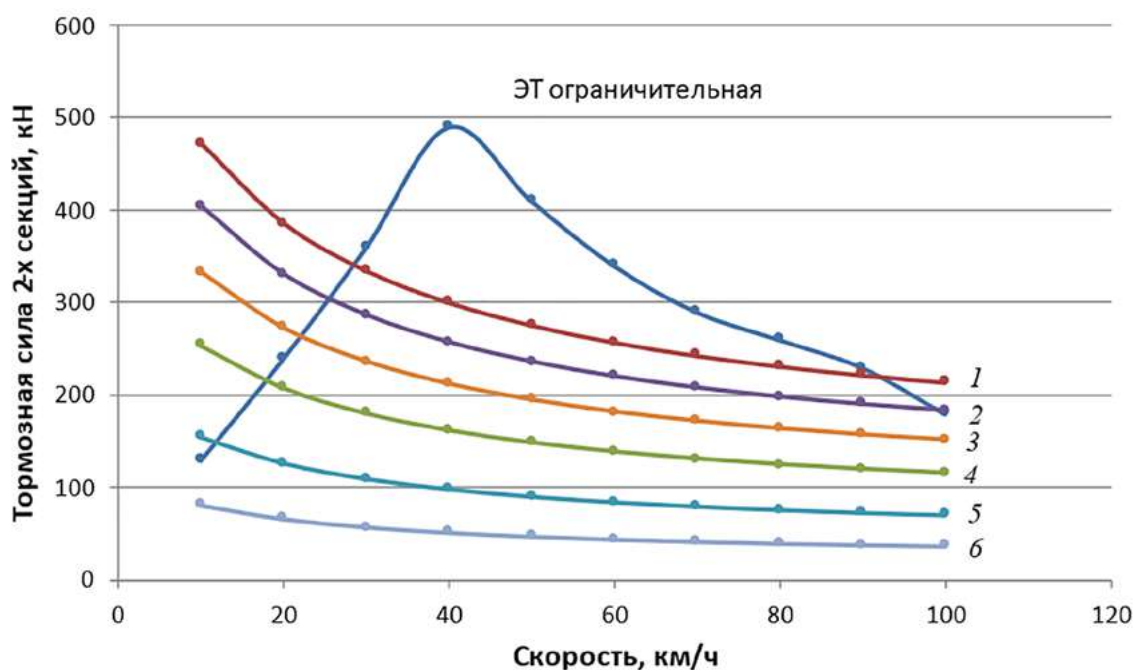


Рис. 7. Тормозные характеристики вспомогательного пневматического и реостатного тормоза тепловоза 2ТЭ25КМ:

$P_{тц}$, МПа: 1 — 0,42; 2 — 0,34; 3 — 0,26; 4 — 0,18; 5 — 0,10; 6 — 0,06

сти движения, тормозная характеристика должна соответствовать текущему положению управляющего органа (рукоятки крана вспомогательного тормоза или ступени торможения поездным тормозом) и соответствующему ему давлению в тор-

мозных цилиндрах. В этом случае вероятность возникновения повышенных продольно-динамических реакций в составе поезда будет соответствовать торможению с применением вспомогательного тормоза и может быть даже уменьшена

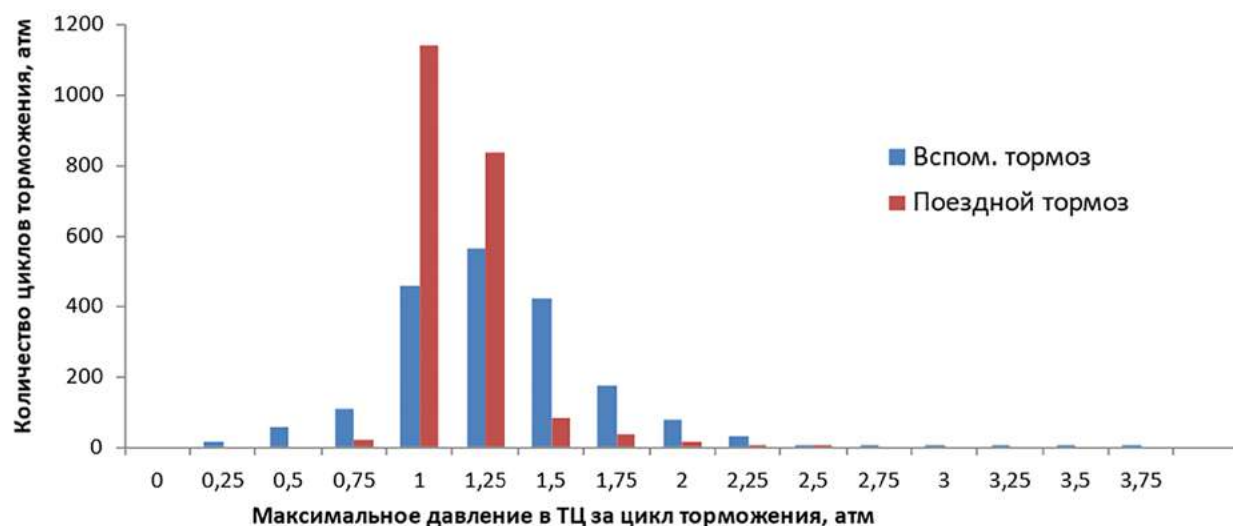


Рис. 8. Группированный статистический анализ максимальных значений давления в ТЦ при использовании разных видов пневматических тормозов

за счет автоматизации контроля интенсивности увеличения тормозной силы в начальный период торможения и управления процессом отпуска пневматического тормоза при комбинированном торможении.

Стандартный алгоритм управления электрическим торможением на тепловозе предусматривает увеличение частоты вращения коленчатого вала дизеля для увеличения расхода охлаждающего воздуха через тяговые электродвигатели. На тепловозе 2ТЭ25КМ при переводе рукоятки задатчика на тормозные позиции частота вращения коленчатого вала дизеля увеличивается с 350 до 555 об/мин [3], что приводит к увеличению расхода топлива примерно на 70 % (с учетом затрат мощности на возбуждение ТЭД в тормозном режиме) по отношению к расходу на холостом ходу дизеля.

Анализ продолжительности циклов торможения (рис. 9) показывает, что она редко превышает 120 с при токах, значительно ниже предельного значения (630 А) (рис. 10).

Учитывая тот факт, что тепловая постоянная времени тягового электродвигателя типа ЭД133 при расходе воздуха, соответствующем частоте вращения вентиляторов охлаждения электриче-

ских машин на холостом ходу дизеля, составляет примерно 7 мин. [12], перегрев якоря ТЭД при торможении будет зависеть от продолжительности режима торможения и среднего значения тормозного тока.

Выполненный по методике ПТР [12] расчет показывает, что для режимов торможения, статистический ряд которых приведен на рис. 9 и 10, без увеличения частоты вращения коленчатого вала дизеля только при продолжительности торможения более 500 с со средним током более 550 А (два цикла торможения из 757 циклов за полгода эксплуатации тепловоза) увеличение температуры за время торможения достигает 18–21 градусов при начальной температуре якоря ТЭД 60 °С, во всех иных случаях оно не превышает 5–8 градусов (рис. 11). Следовательно, частота вращения коленчатого вала дизеля при входе в режим РТ может устанавливаться системой управления в зависимости от величины тормозного тока (возможно, с учетом температуры охлаждающего воздуха) и увеличиваться только при токе, превосходящем 550 А. Это позволит существенно сократить расход топлива на охлаждение ТЭД при торможении как за счет уменьшения механических потерь в дизеле, так и за счет

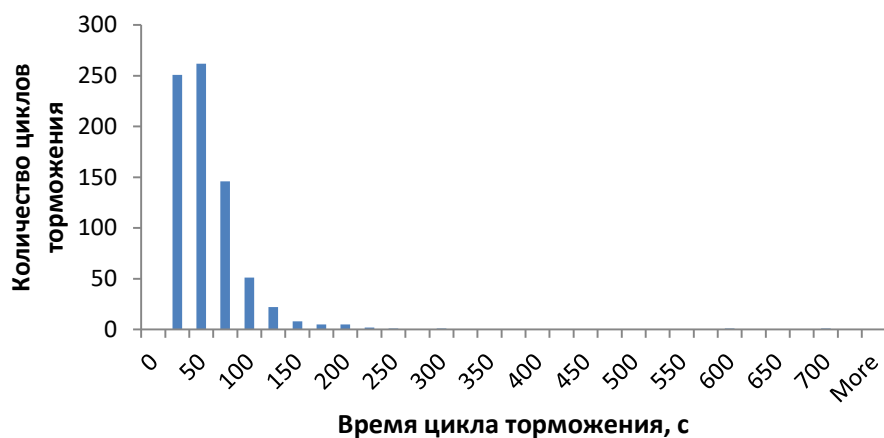


Рис. 9. Группированный статистический ряд продолжительности циклов торможения реостатным тормозом



Рис. 10. Группированный статистический ряд значений среднего тормозного тока в цикле торможения

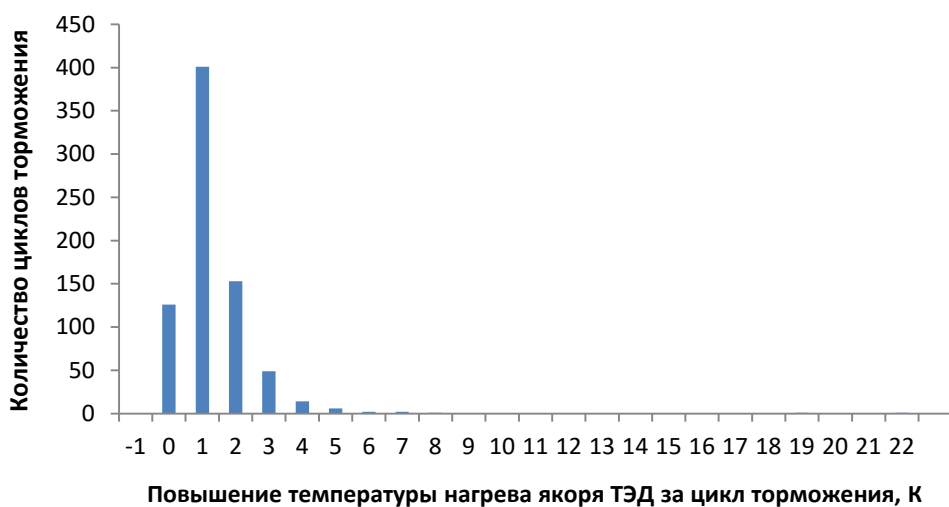


Рис. 11. Группированный статистический ряд значений изменения температуры нагрева ТЭД за цикл торможения ЭТ

повышения индикаторного коэффициента полезного действия дизеля при увеличении цикловой подачи топлива (затраты мощности на возбуждение тягового генератора, потери в генераторе и питание обмоток возбуждения ТЭД в режиме РТ) в режиме холостого хода ДГУ.

Выводы

В результате выполненного анализа эффективности использования тормозных средств грузовых тепловозов в эксплуатации на примере тепловозов 2ТЭ25КМ, эксплуатирующихся на полигонах Октябрьской, Московской и Северной железных дорог, установлено следующее:

1. Имеющиеся на локомотиве виды тормозного оборудования в процессе эксплуатации тепловозов для выполнения регулировочных торможений при скорости движения более 10 км/ч используются с разной интенсивностью.

2. В 83 % циклов торможений применяются пневматические колодочные тормоза состава и локомотива. Реостатный тормоз используется не более чем в 17 % либо не используется вообще.

3. В эксплуатационных локомотивных депо дирекции тяги филиала ОАО «РЖД» отсутствует контроль за использованием реостатного тормоза на тепловозах, решение о его применении принимается машинистом непосредственно в пути следования. В результате во многих эксплуатационных локомотивных депо реостатный тормоз тепловозов не используется, комплектность и исправность его оборудования при выполнении технического обслуживания не проверяются и не восстанавливаются.

4. Более чем в 41 % циклов регулировочных торможений для регулирования скорости поезда используется вспомогательный тормоз локомотива без задействования тормозов состава, при торможении поезда автоматическим тормозом (43 % циклов торможений) вспомогательный тормоз локомотива, как правило, не отпускается.

В результате тормозные колодки и бандажи колесных пар локомотивов используются для регулирования скорости движения поездов, что приводит к увеличению эксплуатационных расходов ОАО «РЖД» за счет увеличения расхода колодок и уменьшения ресурсов бандажей колесных пар.

5. Мощность реостатного тормоза тепловоза, его высокая разрешающая способность по управляющему воздействию (тормозной силе) и хорошая управляемость позволяют полностью исключить колодочное торможение локомотива при использовании поездного тормоза и не менее чем на 60 % уменьшить количество циклов регулировочного торможения вспомогательным тормозом при скоростях движения более 10 км/ч.

6. Использование реостатного тормоза для стабилизации скорости движения поезда в режиме торможения позволяет полностью исключить использование вспомогательного тормоза локомотива при регулировочных торможениях и примерно в два раза сократить количество регулировочных торможений с применением автоматических тормозов поезда.

7. Для исключения нарушения стереотипа действий машинистов при торможении управление как пневматическим, так и реостатным тормозом должно осуществляться изменением положения рукоятки крана вспомогательного тормоза при торможении одиночного локомотива и изменением положения рукоятки поездного крана машиниста при торможении поезда с автоматическим выбором вида тормоза в зависимости от скорости движения, при этом тормозная характеристика должна соответствовать текущему положению управляющего органа (рукоятки крана вспомогательного тормоза или ступени торможения поездным тормозом) и соответствующему ему давлению в тормозных цилиндрах.

9. С целью снижения расхода топлива тепловозом на охлаждение ТЭД в режиме реостатного торможения подача охлаждающего воздуха к ним

(частота вращения коленчатого вала) должна регулироваться в зависимости от продолжительности процесса торможения и величины тормозного тока.

10. Регулярное и эффективное применение реостатного торможения на тепловозах является одним из резервов снижения стоимости стадии владения их жизненного цикла, в связи с чем целесообразна организация постоянного контроля за использованием реостатного тормоза тепловозов в процессе их эксплуатации с использованием современных средств удаленной диагностики и мониторинга параметров локомотивов.

Список источников

1. Кран машиниста № 130: устройство и принцип действия / АО МТЗ-Трансмаш: офиц. сайт. — URL: https://mtz-transmash.ru/news/2010/01/02/kran_mashinista_130_ustrojjstvo_i_princip_dejjstvija (дата обращения: 27.08.2025).

2. Кран вспомогательного тормоза локомотива с дистанционным управлением / АО МТЗ-Трансмаш: офиц. сайт. — URL: <https://mtz-transmash.ru/files/presentation/224d.pdf> (дата обращения: 27.08.2025).

3. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Техническое описание 2ТЭ25КМ РЭ/ЗАО УК БМЗ. — Брянск, 2015. — 153 с.

4. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава: утв. приказом министра транспорта России от 3 июня 2014 г. № 151. — М., 2024 г. — 189 с.

5. Инструкция о порядке применения электрического (реостатного, рекуперативного) тормоза при следовании с поездом: утв. расп. ОАО «РЖД» от 21 ноября 2024 г. № 2883/р. — 7 с.

6. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. / Распоряжение

Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. — М., 2021 г. — 281 с.

7. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. (белая книга)/ Распоряжение ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р. — М., 2018 г. — 113 с.

8. Бушуев С. В. Методы повышения пропускной и провозной способности участков железных дорог техническими средствами автоматики: дисс. ... д-ра техн. наук / С. В. Бушуев. — СПб., 2025. — 364 с.

9. Система автоматизированная контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива АСК: Руководство по эксплуатации 27.Т.358.00.00.000 РЭ. — Коломна: АО ВНИКТИ, 2010. — 36 с.

10. Сергеев С. В. Микропроцессорная система управления электрооборудованием тепловоза 2ТЭ25КМ / С. В. Сергеев, А. Ю. Буняев, С. З. Гургуров, М. А. Егоров // Локомотив. — 2019. — № 5(749). — С. 24–26.

11. Ким С. И. Контроль исправности тепловоза ТЭМ7А перед началом работы в режиме «Автомашинист» / С. И. Ким, А. А. Пронин, С. В. Елисеев // Локомотив. — 2023. — № 2(794). — С. 5–6.

12. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12 мая 2016 г. № 867р. — М.: ОАО «РЖД», 2016. — 514 с.

13. Магистральный двухсекционный грузовой тепловоз 2ТЭ25К мощностью 2х2500 кВт (2х3400 л. с.) с электрической передачей переменного — постоянного тока с поосным регулированием силы тяги: Технические условия ТУ 3181-001-00210766-07. — Брянск: УК «БМЗ», 2007. — 111 с.

Дата поступления: 27.10.2025

Решение о публикации: 30.11.2025

Контактная информация:

ТАНАЕВ Валерий Фаритович — lt@pgups.ru

Analysis of the Efficiency of Diesel Locomotive Brake Equipment

V. F. Tanaev

JSC “Russian Railways”, 2/1, bld. 1, Novaya Basmannaya str., Moscow, 107174, Russian Federation

For citation: Tanaev V. F. Analysis of the Efficiency of Diesel Locomotive Brake Equipment // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 880–894. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-880-894

Summary

Purpose: The brake equipment in a modern freight locomotive with an electric transmission incorporates an automatic straight brake for controlling the pneumatic brake equipment of the train and locomotive, a locomotive manual straight brake, and an electrodynamic rheostatic brake. The purpose of this paper is to conduct a comparative analysis of the efficiency of different types of diesel locomotive brakes during operation and to determine ways to improve them. **Methods:** A statistical analysis was conducted on data obtained from contemporary locomotive monitoring systems, focusing on the calculations of heating and wheel tread loosening during extended braking. **Results:** The analysis of data from remote monitoring of the power plant parameters for 2TE25KM diesel locomotives operating on the Oktyabrskaya, Moskovskaya and Severnaya railways demonstrate that over 83% of adjustment braking cycles are performed using the pneumatic brake shoes of both the train and locomotive. Notably, the locomotive’s auxiliary brake remains unengaged when automatic straight brakes are applied, resulting in the brake shoes and wheel treads of the diesel locomotives being primarily responsible for train braking. Furthermore, the rheostatic braking is used in less than 17% of braking cycles, even though it has the capacity to entirely replace the automatic straight brake and decrease reliance on the locomotive auxiliary brake by 60% at speeds exceeding 10 km/h. **Practical significance:** Enhancing the efficiency of rheostatic brake systems in diesel locomotives requires the optimization of the control system to uphold the established standards of brake management for locomotive crews during operation.

Keywords: Rheostatic brake, automatic straight brake, locomotive auxiliary brake, braking cycle, braking force, braking power.

References

1. *Kran mashinista № 130: ustroystvo i printsip deystviya* [Driver’s Valve № 130: Design and Operation Principle]. Available at: https://mtz-transmash.ru/news/2010/01/02/kran_mashinista_130_ustrojstvo_i_princip_dejstvija (accessed: August 27, 2025). (In Russian)
2. *Kran vspomogatel’nogo tormoza lokomotiva s dstantsionnym upravleniem* [Locomotive Auxiliary Brake Valve with Remote Control]. Available at: <https://mtz-transmash.ru/files/presentation/224d.pdf> (accessed: August 27, 2025). (In Russian)
3. *Magistral’nyy gruzovoy dvukhseksionnyy teplovoz 2TE25KM. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast’ 1. Tekhnicheskoe opisanie 2TE25KM RE* [Mainline Freight Two-Section Diesel Locomotive 2TE25KM. Operation Manual. Part 1. Technical Description 2TE25KM RE]. Bryansk, 2015, 153 p. (In Russian)
4. *Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: utv. prikazom ministra transporta Rossii ot 3 iyunya 2014 g. № 151* [Rules for the Technical Maintenance of Braking Equipment and Brake Control of Railway Rolling Stock: approved by Order of the Minister of Transport of Russia dated June 3, 2014, № 151]. Moscow, 2024, 189 p. (In Russian)
5. *Instruktsiya o poryadke primeneniya elektricheskogo (reostatnogo, rekuperativnogo) tormoza pri sledovanii s poezdom: utv. rasp. OAO “RZhD” ot 21 noyabrya 2024 g.*

№ 2883/r [Instructions on the Procedure for Applying Electric (Rheostatic, Regenerative) Brake When Traveling with a Train: approved by Resolution of JSC Russian Railways dated November 21, 2024, № 2883/r]. 7 p. (In Russian)

6. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 g. s prognozom na period do 2035 g. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r* [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast for the Period up to 2035. Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 № 3363-r]. Moscow, 2021, 281 p. (In Russian)

7. *Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga "RZhD" na period do 2025 g. i na perspektivu do 2030 g. (belaya kniga). Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 17 aprelya 2018 g. № 769/r* [Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Railways Holding Company for the Period up to 2025 and for the Future up to 2030 (White Paper). Order of JSC Russian Railways of April 17, 2018 № 769/r]. Moscow, 2018, 113 p. (In Russian)

8. Bushuev S. V. *Metody povysheniya propusknoy i provoznoy sposobnosti uchastkov zheleznikh dorog tekhnicheskimi sredstvami avtomatiki: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Methods for Increasing the Throughput and Carrying Capacity of Railway Sections Using Automation Equipment: Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2025, 364 p. (In Russian)

9. *Sistema avtomatizirovannaya kontrolya parametrov raboty dizel'nogo podvizhnogo sostava i ucheta dizel'nogo topliva ASK: Rukovodstvo po ekspluatatsii 27.T.358.00.00.000 RE* [Automated System for Monitoring Diesel Rolling Stock Operation Parameters and Diesel Fuel Accounting ASK: Operation Manual 27.T.358.00.00.000 RE]. Kolomna, 2010, 36 p. (In Russian)

10. Sergeev S. V., Bunyaev A. Yu., Gurgurov S. Z., Egorov M. A. *Mikroprotsessornaya sistema upravleniya elektrooborudovaniem teplovoza 2TE25KM* [Microprocessor Control System for Electrical Equipment of Diesel Locomotive 2TE25KM]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2019, Iss. 5(749), pp. 24–26. (In Russian)

11. Kim S. I., Pronin A. A., Eliseev S. V. *Kontrol' ispravnosti teplovoza TEM7A pered nachalom raboty v rezhime "Avtomashinist"* [Fault Detection of Diesel Locomotive TEM7A Before Starting in "Automated Driver" Mode]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2023, Iss. 2(794), pp. 5–6. (In Russian)

12. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty. Utverzhdeny rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12 maya 2016 g. № 867r* [Rules for Traction Calculations for Train Operation. Approved by Order of JSC Russian Railways dated May 12, 2016, № 867r]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2016, 514 p. (In Russian)

13. *Magistral'nyy dvukhseksionnyy gruzovoy teplovoz 2TE25K moshchnost'yu 2x2500 kVt (2x3400 l. s.) s elektricheskoy peredachey peremennno — postoyannogo toka s poosnym regulirovaniem sily tyagi: Tekhnicheskie usloviya TU 3181-001-00210766-07* [Mainline two-section freight diesel locomotive 2TE25K with a capacity of 2x2500 kW (2x3400 hp) with AC/DC electric transmission with axle-by-axle traction control: Technical Specifications TU 3181-001-00210766-07]. Bryansk, 2007, 111 p. (In Russian)

Received: October 27, 2025

Accepted: November 30, 2025

Author's information:

Valery F. TANAEV — lt@pgups.ru

УДК 625.144.4

Моделирование логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ

Е. В. Пакулина

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

Для цитирования: Пакулина Е. В. Моделирование логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 895–905. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-895-905

Аннотация

Цель: Рельсовые плети — один из наиболее важных ресурсов, используемых при проведении путевых работ. В связи с планируемым строительством высокоскоростной магистрали повышаются требования к организации поставок ресурсов, а особенно к срокам доставки. В настоящее время вопросы, связанные с логистикой рельсовых плетей, изучены мало. Целью настоящего исследования является оценка временных характеристик поставки рельсовых плетей и разработка предложений по сокращению продолжительности доставки плетей до потребителей. **Методы:** В качестве инструмента исследований выбран метод имитационного моделирования. **Результаты:** Выполнен анализ логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ, выявлены и проанализированы факторы, влияющие на продолжительность поставки. Построенная имитационная модель логистической цепи позволила определить, что существенным недостатком действующей системы поставки плетей для путевых работ является отсутствие склада. Для сокращения времени доставки и устранения задержек предложено ввести в систему дополнительный элемент — промежуточный склад-накопитель. **Практическая значимость:** Применение в логистической цепи склада-накопителя позволит сократить продолжительность доставки рельсовых плетей, уменьшить количество часов простоя рельсосварочного предприятия, а также снизить издержки, связанные с поставками рельсовых плетей.

Ключевые слова: Логистика, логистическая цепь, путевые работы, рельсовые плети, обеспечение ресурсами путевых работ, своевременность поставок, логистическая цепь поставки рельсовых плетей.

Введение

Прогресс в железнодорожной отрасли, проявляющийся в проектировании новых локомотивов, вагонов и систем управления, а также в их интеграции в существующую инфраструктуру, невозможен без широкого применения бесстыкового пути [1]. Отсутствие стыков при укладке пути позволяет уменьшить динамические нагрузки на рельсовые пути и колесные пары подвижного состава, обеспечить более плавный ход поездов, сократить расход металла на строительство и обслуживание, а также снизить эксплуатаци-

онные расходы. Вследствие чего в последние годы значительно возросли объемы капитальных ремонтов и работ по реконструкции пути с переходом на бесстыковой «бархатный путь».

В марте 2024 г. началось строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург, протяженность которой будет составлять 679 км [2]. Одним из важнейших ресурсов для строительства магистрали являются рельсовые плети, применяемые при укладке бесстыкового пути. Ввиду большой протяженности и масштабы строительства

потребуется большие объемы рельсовых плетей, применяемых при укладке бесстыкового пути, что однозначно приведет к значительному увеличению заказа и размера поставки.

В настоящее время готовые рельсовые плети доставляются напрямую от производителя — рельсосварочного предприятия (РСП) к исполнителям путевых работ — путевым машинным станциям (ПМС) в соответствии с предварительной заявкой. Логистическая цепь изготовления и поставки рельсовых плетей в места производства путевых работ состоит из следующих этапов: производство 100-метровых рельсов на металлургическом комбинате (МК); отгрузка и доставка сырья на РСП; прием и разгрузка сырья на предприятии; производство рельсовых плетей на РСП; отгрузка и доставка готовой продукции потребителям — ПМС. Схема логистической цепи изготовления и поставки рельсовых плетей представлена на рис. 1.

Основной задачей логистической цепи является обеспечение необходимого количества рельсовых плетей в точное время и в определенном месте. Логистическая цепь включает в себя несколько основных этапов, каждый из которых

имеет свое значение и влияет на общую эффективность процесса. При этом точное соблюдение сроков на каждом этапе логистической цепи критически важно для ее эффективной работы.

Для потребителя ключевым фактором в логистической цепи выступает продолжительность доставки T_d . Чем быстрее ПМС получает нужный ресурс, тем оперативнее может приступить к работе, и это влияет на своевременность выполнения путевых работ. Вопросы оценки продолжительности доставки и способы ее сокращения являются актуальными и значимыми. Таким образом, целью настоящего исследования является оценка временных характеристик поставки рельсовых плетей и разработка предложений по сокращению продолжительности доставки плетей до потребителей.

Продолжительность доставки является случайной величиной и зависит от многих факторов. Практика показывает, что вследствие различных обстоятельств, связанных с техническими неисправностями на железной дороге и организационными причинами, рельсовозные составы (РВС) для загрузки рельсовых плетей приходят в РСП с задержкой, которая может составлять от

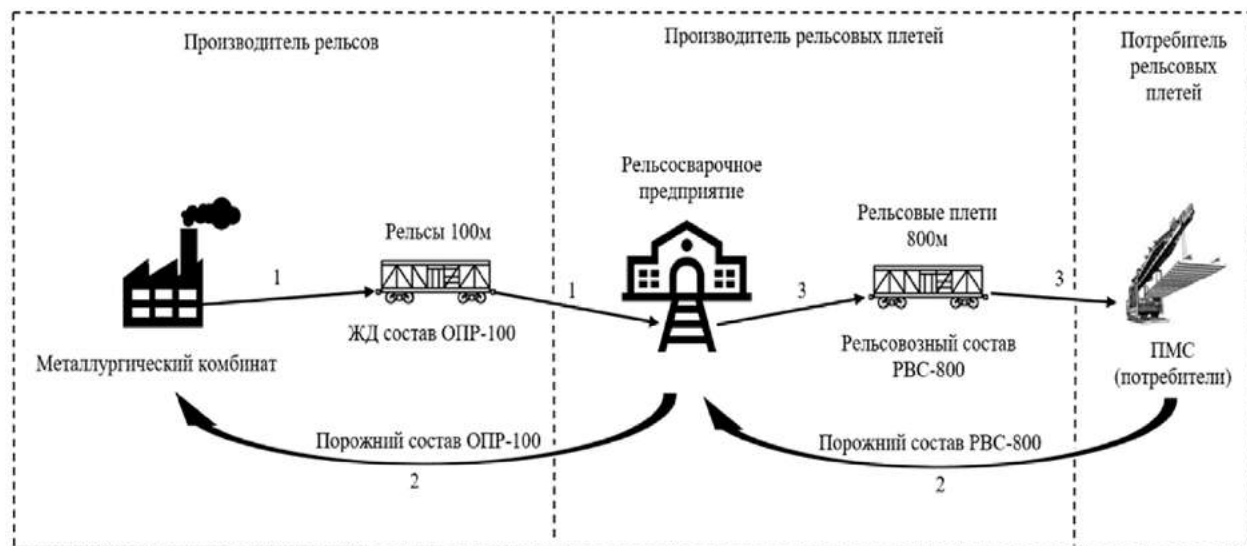


Рис. 1. Схема логистической цепи изготовления и поставки рельсовых плетей:

1 — доставка рельсов длиной 100 м; 2 — возврат подвижного состава;

3 — доставка готовых рельсовых плетей

нескольких дней до нескольких недель [3]. Например, на ведущем предприятии Октябрьской железной дороги РСП-1 основными причинами задержек поставки рельсовых плетей потребителю и простоев предприятия за последние несколько лет являлись нехватка РВС и несвоевременная поставка 100-метровых рельсов из МК (рис. 2).

Отсутствие возможности хранения готовых изделий вынуждает предприятие приостанавливать производство до момента прибытия РВС. Данные обстоятельства приводят к существенным издержкам изготовителей плетей и производителей путевых работ, препятствуют возможности производства плетей в соответствии с запланированным количеством.

Исполнители путевых работ сталкиваются с проблемой недопоставки ресурсов в установленные сроки, что отражается на сроках производства работ. Очевидно, что логистическую цепь поставки ресурсов для путевых работ необходимо исследовать и совершенствовать.

Вопросы оценки логистических цепей освещались в работах [4–8]. В исследованиях [4, 5] эффективность логистической цепи рассматривается как рациональное распределение участников по выполняемым функциям логистического процесса. Д. И. Афанасенко [6] предлагает рассматривать логистическую цепь как сеть взаимодей-

ствия множества партнеров, взаимосвязанных материальными и связанными с ними другими потоками. Оценка деятельности сети производится по критериям времени перемещения всех потоков в сети, затратам на выполнение отдельных логистических функций и качества логистического процесса в целом. В статье [7] используется понятие «логистический потенциал цепи поставок», с помощью которого оценивается своевременность, точность и качество продвижения материального потока. В исследовании [8] подход к эффективности логистической цепи включает формирование ее видимости и прослеживаемости посредством установления сотрудничества между участниками.

Для анализа и оценки логистических цепей преимущественно используют метод имитационного моделирования. Вопросы имитационного моделирования логистических цепей рассматривались в работах [9–12]. В работе [9] описаны механизмы сценарного моделирования цепочек поставок в рамках промышленного холдинга. Авторами исследования [10] предложена общая формализация модели ключевых задач для оценки и прогнозирования эффективности производственных и транспортно-логистических цепей в заданных условиях. В исследовании [11] формулируется подход к моделированию логи-

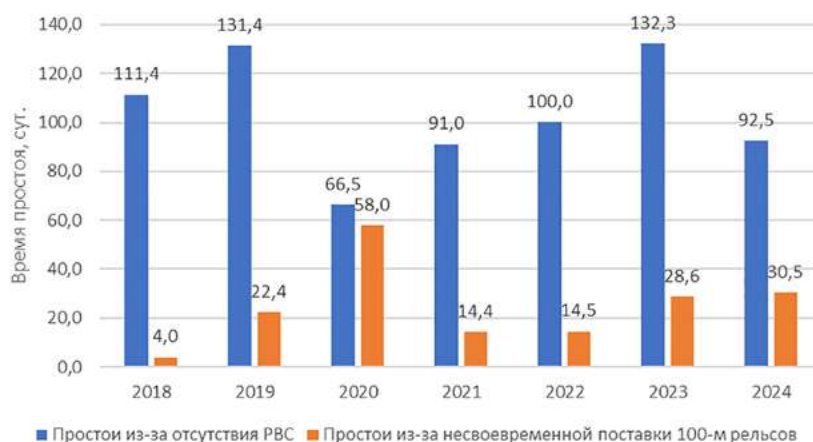


Рис. 2. Распределение простоев рельсостроительного предприятия РСП-1 по годам и причинам, сут. (по данным РСП-1 за 2018–2024 гг.)

стической цепи с объединением потоков и процессов в единую систему, который может быть использован для оценки эффективности существующих видов логистических цепей. Автор [12] предложил метод оптимизации логистических цепей поставок, основанный на агентном моделировании.

Представленные исследования посвящены анализу и построению моделей производственных логистических цепей, применимых к широкому спектру отраслей. Однако вопрос оценки продолжительности доставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ в известных источниках освещен слабо. Поэтому в данном исследовании предпринята попытка построить имитационную модель логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ, оценка которой будет производиться на основе одного из ключевых параметров логистической цепи — продолжительности доставки рельсовых плетей. Кроме того, модель позволяет оценить влияние дополнительного элемента в цепи — промежуточного склада на продолжительность доставки.

Методика моделирования логистической цепи поставки рельсовых плетей

Целью моделирования логистической цепи изготовления и поставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ является определение средней продолжительности доставки рельсовых плетей $\overline{T}_д$ от производителя — РСП до потребителей — ПМС.

Математическая модель задачи определения средней продолжительности доставки рельсовых плетей выглядит следующим образом:

$$\overline{T}_д = \overline{T}_{изг} + \overline{T}_{пер} + \overline{T}_{пр}, \quad (1)$$

где $\overline{T}_{изг}$ — средняя продолжительность изготовления рельсовых плетей, ч.,

$$\overline{T}_{изг} = \overline{T}_{компл} + \overline{T}_{всп}. \quad (2)$$

Здесь $\overline{T}_{компл}$ — средняя продолжительность комплектования рельсовой плети, ч.;

$\overline{T}_{всп}$ — средняя продолжительность вспомогательных работ, ч.

$\overline{T}_{пер}$ — средняя продолжительность движения РВС в пути, ч,

$$\overline{T}_{пер} = \overline{L} / \overline{V}_{уч}. \quad (3)$$

Здесь $\overline{L}$ — среднее расстояние до ПМС, км;

$\overline{V}_{уч}$ — средняя участковая скорость движения состава, км/ч.

$\overline{T}_{пр}$ — средняя продолжительность погрузо-разгрузочных операций, ч,

$$\overline{T}_{пр} = \overline{T}_{выгр} + \overline{T}_{погр} + \overline{T}_{разг}. \quad (4)$$

Здесь $\overline{T}_{выгр}$ — средняя продолжительность разгрузки сырья в РСП, ч;

$\overline{T}_{погр}$ — средняя продолжительность погрузки рельсовых плетей на РВС, ч;

$\overline{T}_{разг}$ — средняя продолжительность разгрузки рельсовых плетей в ПМС, ч.

Анализ зависимостей (1)–(4) показывает, что решение задачи определения средней продолжительности доставки рельсовых плетей в аналитическом виде представляет сложность ввиду большого количества факторов, влияющих на конечный показатель. Поэтому удобно определять значение показателя путем моделирования.

Имитационное моделирование — метод исследования системы с помощью замены реальной системы на компьютерную модель и дальнейшего проведения экспериментов над моделью системы. Модель представляет собой логические связи и функциональные отношения, описывающие логику работы элементов исследуемой системы [13]. Она позволяет исследовать параметры изучаемого предмета с учетом меняющихся параметров и величин в зависимости от времени, которые влияют на показатели взаимодействия элементов системы.

В настоящее время при разработке имитационных моделей используют три основных подхода:

дискретно-событийное (процессное) моделирование, системную динамику и агентное моделирование. В дискретно-событийном моделировании функционирование системы представляется как хронологическая последовательность событий. Событие происходит в определенный момент времени и знаменует собой изменение состояния системы. Системная динамика — направление в изучении сложных систем, исследующее их поведение во времени и в зависимости от структуры элементов системы и взаимодействия между ними. Системно-динамические модели состоят из петель обратной связи, которые формируют поведение системы. Агентная модель представляет реальный мир в виде многих отдельно специфицируемых активных подсистем, называемых агентами. Каждый из агентов взаимодействует с другими агентами, которые образуют для него внешнюю среду, и в процессе функционирования может изменить как внешнюю среду, так и свое поведение [14]. Все перечисленные методы применимы для моделирования цепей поставок, выбор конкретного подхода зависит от целей проектирования модели.

В качестве средств для имитационного моделирования можно использовать различные программные средства, например Arena, Simulink, Actor Pilgrim, GPSS, AnyLogic, iWebsim, Simcad Pro, SimEvents и др. [14, 15]. Существующие средства имитации в основном предоставляют возможность моделирования узконаправленных систем.

Для решения поставленной задачи была использована система AnyLogic. В отличие от остальных программных средств, AnyLogic позволяет решать широкий круг задач за счет объединения в своей библиотеке различных подходов и конкретных отраслей для моделирования. Это позволяет моделировать транспортные потоки с использованием специализированных библиотек, включающих в том числе блоки железнодорожных составов и специализированных агентов, связанных с железнодорожным

транспортом. Поэтому модель логистической цепи поставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ была выполнена в программе AnyLogic, версия 8.9.6.

Исходными данными для моделирования являются: количество рельсов, произведенных МК, шт.; объемы рельсов, отгруженных в РСП, шт.; количество рельсовых плетей, произведенных РСП, шт.; количество отгруженных в ПМС рельсовых плетей, шт.; расстояние от РСП до ПМС, км; средняя участковая скорость рельсовозных составов, км/ч. Исходные данные были получены от Рельсосварочного предприятия № 1 Октябрьской железной дороги и дирекции по ремонту пути «Путьрем».

В структуре модели предусмотрены следующие типы потоков: производственный (рельсы и рельсовые плети) и транспортный, предназначенные для перемещения сырья и готовой продукции. Выпуск рельсовых плетей моделировался блоком типа *Source*, потребление очередной рельсовой плети — блоком *Sink*. Составы для транспортировки рельсов и рельсовозные составы, которые являются ресурсами одного типа, моделировались блоками *trainSource*. Потоки были замкнуты для моделирования перемещения составов в пункт назначения и обратно. Процесс погрузки рельсов и рельсовых плетей моделировался блоком *Pickup*, процесс разгрузки — блоком *Dropoff*. Схема имитационной модели показана на рис. 3. В табл. 1 приведены параметры и их значения, использованные при моделировании.

Для оценки продолжительности доставки рельсовых плетей до потребителей в модель были добавлены блоки для измерения времени *DostStart* и *DostFin1*, *DostFin2*, *DostFin3*.

Продолжительность моделирования — 1 год, шаг моделирования — 1 месяц. Выбор шага моделирования был обусловлен особенностями предоставленных исходных данных, время выполнения одиночной операции исчислялось в часах.

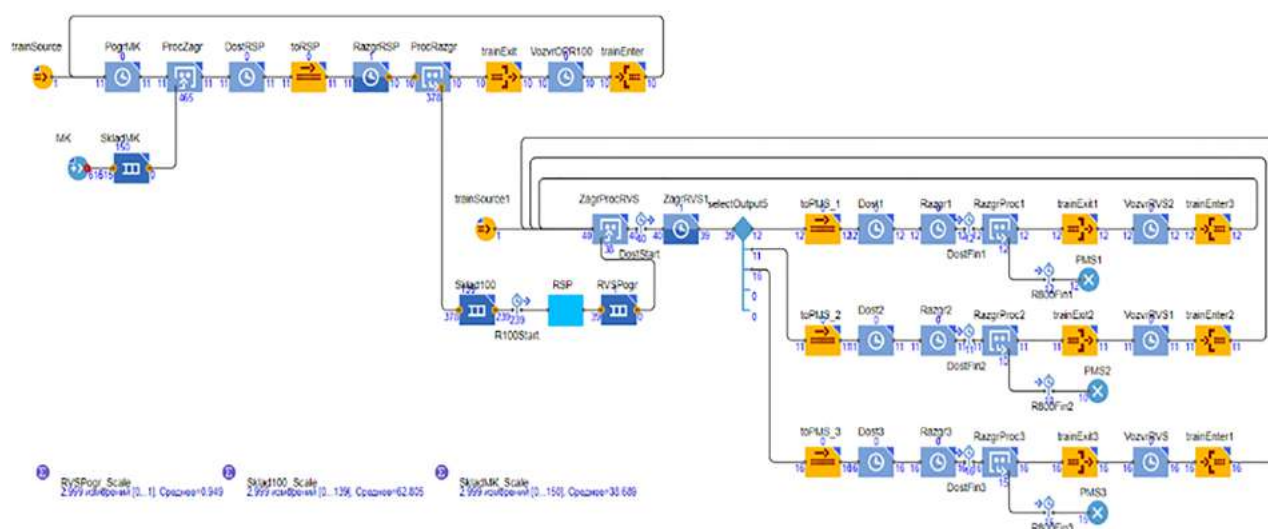


Рис. 3. Схема имитационной модели логистической цепи поставки рельсовых плетей

Таблица 1. Список параметров и их значений, использованных в модели

№ п/п	Имя элемента	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	MK	Количество произведенных рельсов	2100	шт/месяц
2	DostRSP	Продолжительность доставки рельсов в PCП	98,4	ч
3	RSP	Время производства рельсовой плети на PCП	7,5	ч
4	ZagrRVS 1,2,3	Время загрузки рельсовых плетей на PBC	Сценарий № 1 — 13,3 Сценарий № 2 — 10	ч
5	Dost 1,2,3	Время доставки рельсовых плетей до ПМС	интервал 2,85–13,88	ч
6	Razgr 1,2,3	Время разгрузки рельсовых плетей в ПМС	интервал 29,5–82	ч

Моделирование логистической цепи обеспечения путевых работ выполнялось при двух сценариях:

Сценарий № 1: моделируется поставка плетей при условиях существующей логистической цепи. При исполнении данного сценария происходит накопление рельсовых плетей в одном из накопительных блоков, которое может привести к остановке модели.

Сценарий № 2: моделируется поставка плетей, при этом в модель добавляется промежуточный склад рельсовых плетей. Модель была дополнена блоком-накопителем *Sklad800* (рис. 4). Предварительно была установлена емкость склада рельсовых плетей в размере 100 единиц, что было сделано для последующей оценки реальной потребности в складских мощ-

ностях и их вместимости. В данном сценарии рельсовые плети находятся на промежуточном складе на момент подачи PBC для загрузки. Это позволяет снизить влияние колебаний процесса изготовления рельсовых плетей на продолжительность доставки.

Результаты моделирования и обсуждение

По результатам имитационного моделирования была определена средняя продолжительность доставки рельсовых плетей до ПМС по сценарию № 1 и сценарию № 2.

В результате моделирования логистической цепи по двум сценариям были построены графики фактической продолжительности доставки рельсовых плетей от PCП до ПМС (рис. 5) и гистограммы распределения вероятностей про-

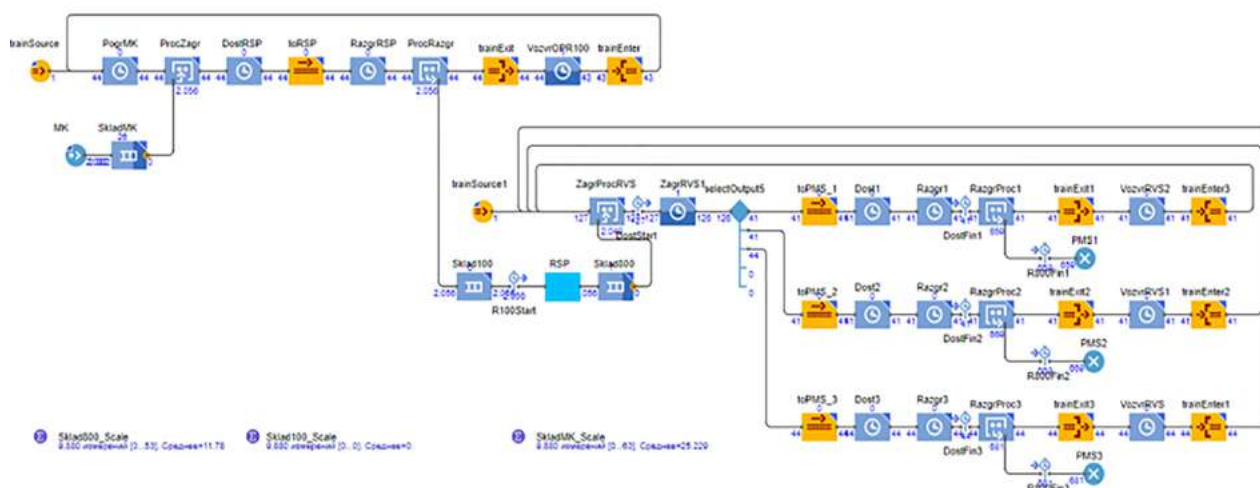


Рис. 4. Схема имитационной модели логистической цепи с промежуточным складом-накопителем рельсовых плетей

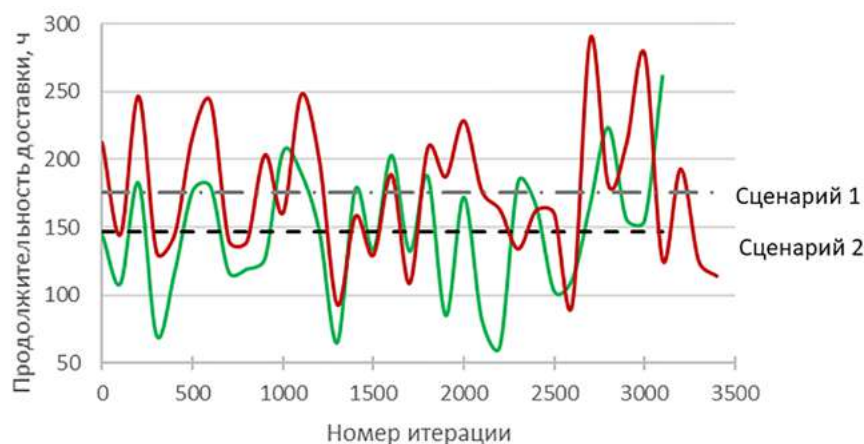


Рис. 5. График фактической продолжительности доставки рельсовых плетей от РСП до ПМС, включающий время производства, загрузки и разгрузки

должительности перемещения РВС от РСП до ПМС (рис. 6).

Согласно рис. 5, среднее значение продолжительности доставки рельсовых плетей от РСП до ПМС, включающее время производства, загрузки и разгрузки плетей, по сценарию № 1 составляет 175,45 ч, а по сценарию 2 — 147,27 ч. Таким образом, наличие склада уменьшает продолжительность доставки от РСП до ПМС на 16 %, что позволяет произвести и доставить больший объем рельсовых плетей.

Сравнение средней продолжительности доставки рельсовых плетей (рис. 6) показало, что

при наличии промежуточного склада-накопителя продолжительность общего цикла доставки от МК до ПМС сокращается на 10 % (табл. 2).

Одним из факторов, влияющих на продолжительность доставки, является дальность перевозки рельсовых плетей. Вопрос влияния продолжительности доставки и средней участковой скорости потребует дополнительных исследований.

Заключение

В рамках настоящего исследования был выполнен анализ логистической цепи поставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ. При-

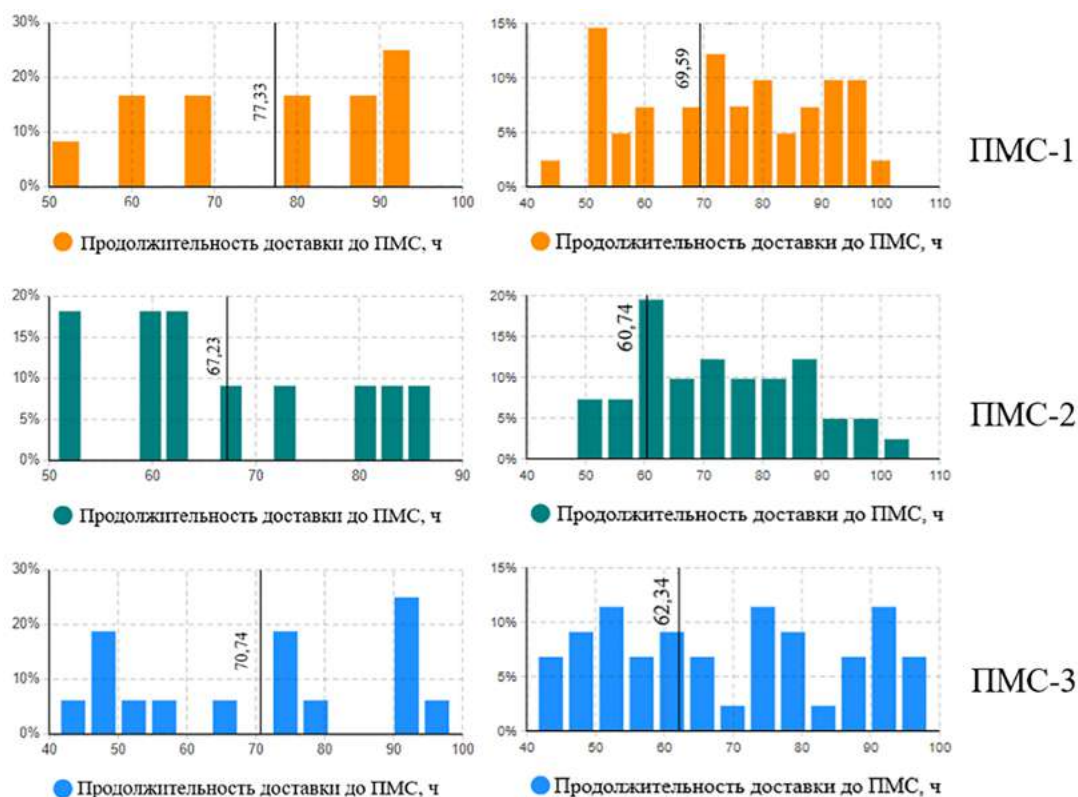


Рис. 6. Распределение вероятностей продолжительности перемещения РВС от РСР до ПМС:
 а — сценарий № 1; б — сценарий № 2

Таблица 2. Средняя продолжительность доставки рельсовых плетей от РСР до ПМС

Потребители	Средняя продолжительность доставки до ПМС без промежуточного склада, ч	Средняя продолжительность доставки до ПМС с промежуточным складом, ч
ПМС-1	77,33	69,59
ПМС-2	67,22	60,74
ПМС-3	70,74	62,34
Среднее по сценарию, ч	71,76	64,22

менение системы имитационного моделирования показало, что действующая в настоящее время цепь поставки рельсовых плетей имеет существенные недостатки в виде задержек доставки рельсовых плетей в места путевых работ. Для сокращения времени доставки и устранения задержек было предложено введение в систему дополнительного элемента — промежуточного склада-накопителя, наличие которого позволяет уменьшить продолжительность доставки рельсовых плетей от РСР до ПМС на 16 %, продолжительность общего цикла

доставки от МК до ПМС сокращается на 10 %. Применение модели логистической цепи поставки рельсовых плетей в места путевых работ с промежуточным складом позволит сократить издержки производителей и потребителей, а также время на производство путевых работ.

В связи с возможным изменением технологии изготовления 800-метровых плетей и применением мобильного рельсосварочного комплекса для сварки плетей в пути (до 1600 м) может потребоваться дополнительное исследование

логистических цепей поставки материалов для путевых работ.

Список источников

1. Железная дорога без стыков: все о бесстыковом пути. — URL: <https://www.zaportal.ru/articles/zheleznyaya-doroga-bez-stykov> (дата обращения: 20.08.2025).

2. Высокоскоростная магистраль «Две столицы». Проект Президента РФ. — URL: <https://vsm2stl.ru/#train> (дата обращения: 20.08.2025).

3. Малахова Т. А. Анализ причин задержек грузовых поездов на участках железной дороги / Т. А. Малахова // Наука, техника и образование. — 2017. — № 10(40). — С. 34–36.

4. Игонина А. Е. Оценка эффективности логистической цепи / А. Е. Игонина // Вестник Ульяновского государственного технического университета. — 2008. — № 1(41). — С. 72–74.

5. Ларин О. Н. О способах оценки работы цепей поставок / О. Н. Ларин // Транспорт и логистика устойчивого развития территорий, бизнеса, государства (драйверы роста, тренды и барьеры): материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 21 ноября 2020 года / Государственный университет управления. — М.: ГУУ, 2025. — С. 188–191.

6. Афанасенко Д. И. Управление логистической цепью как сетью / Д. И. Афанасенко // Вестник Томского государственного университета. — 2009. — № 319. — С. 135–137.

7. Полещук И. И. Логистический потенциал цепи поставок: понятие и показатели оценки / И. И. Полещук, О. С. Гулягина // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D: Экономические и юридические науки. — 2014. — № 14. — С. 141–145.

8. Куликова О. М. Проектирование эффективной логистической цепочки поставок / О. М. Куликова, С. Д. Суворова // Региональные проблемы преобразования экономики. — 2021. — № 4(126). — С. 122–129.

9. Максимов А. М. Сценарное моделирование цепочек поставок в транспортно-логистической системе про-

мышленного холдинга / А. М. Максимов, К. Ж. Кудайберген // Недропользование и транспортные системы. — 2022. — Т. 12. — № 2. — С. 25–37.

10. Жуков А. О. Разработка модели ключевых задач для оценки и прогнозирования эффективности производственных и транспортно-логистических цепочек в заданных условиях / А. О. Жуков, У. А. Пестун, Ю. А. Давидович // Стратегическое планирование и развитие предприятий: материалы XXI Всероссийского симпозиума, Москва, 10–11 ноября 2020 года / Центральный экономико-математический институт РАН. — М.: ЦЭМИ РАН, 2020. — С. 680–681.

11. Демченко А. И. Процессно-ориентированные подходы к проектированию и моделированию логистических цепей / А. И. Демченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. — 2014. — Т. 8. — № 4. — С. 169–178.

12. Жук М. А. Моделирование системы поддержки оптимизации логистических цепочек поставок / М. А. Жук, И. А. Цыганова // Инновации и инвестиции. — 2016. — № 12. — С. 104–108.

13. Кораблев Ю. А. Имитационное моделирование: учебник / Ю. А. Кораблев. — М.: КНОРУС, 2017. — С. 10–11.

14. Белов А. Г. Методы имитационного моделирования / А. Г. Белов, С. А. Моисеев, А. В. Григорьев // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2014. — Т. 1. — С. 277–279.

15. Малыгина С. Н. Обзор современных средств имитационного моделирования / С. Н. Малыгина, Е. О. Неупокоева // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. — 2022. — Т. 13. — № 2. — С. 134–143.

Дата поступления: 20.10.2025

Решение о публикации: 19.11.2025

Контактная информация:

ПАКУЛИНА Елена Вячеславовна — ст. преподаватель;
elena_pakulina29@mail.ru

Modelling a Rail Supply Chain for Railway Track Maintenance

E. V. Pakulina

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

For citation: Pakulina E. V. Modelling a Rail Supply Chain for Railway Track Maintenance // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 895–905. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-895-905

Summary

Purpose: Welded rails represent a critical element in the maintenance of a railway track. In the context of high-speed railway construction, the demand for efficient resource supply management, particularly concerning delivery timelines, is becoming increasingly stringent. However, existing research has inadequately addressed the logistical challenges associated with rail delivery. This study aims to assess the time-related aspects of welded rail deliveries and to propose strategies for minimizing the delivery time to end users. **Methods:** Simulation modelling has been employed as the research tool. **Results:** The analysis of the logistics chain for welded rail delivery for track maintenance has revealed various factors affecting the rail delivery timelines. The simulation model of the logistics chain has highlighted that a primary issue within the current rail delivery system for track maintenance is the insufficient availability of storage facilities. To minimize delivery times and eradicate delays, the proposal involves the integration of an intermediate storage warehouse into the system. **Practical significance:** The use of an intermediate storage warehouse will reduce the rail delivery time, decrease the downtime of the rail welding facility, and reduce the costs related to the supply of welded rails.

Keywords: Logistics, logistics chain, track maintenance work, welded rail lengths, resource logistics for track work, delivery timelines, logistics of welded rail supply chain.

References

1. *Zheleznaya doroga bez stykov: vse o besstykovom puti* [Railroad without joints: all about continuous welded rail]. Available at: <https://www.zaoportal.ru/articles/zheleznaya-doroga-bez-stykov> (accessed: August 20, 2025). (In Russian)
2. *Vysokoskorostnaya magistral' "Dve stolitsy". Proekt Prezidenta RF* [High-speed railway "Two capitals". Project of the President of the Russian Federation]. Available at: <https://vsm2stl.ru/#train> (accessed: August 20, 2025). (In Russian)
3. Malakhova T. A. Analiz prichin zaderzhek gruzovykh poezdov na uchastkakh zheleznoy dorogi [Analysis of the causes of freight train delays on railway sections]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education]. 2017, Iss. 10(40), pp. 34–36. (In Russian)
4. Igonina A. E. Otsenka effektivnosti logisticheskoy tsepi [Evaluation of logistics chain efficiency]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. 2008, Iss. 1(41), pp. 72–74. (In Russian)
5. Larin O. N. O sposobakh otsenki raboty tsepey postavok [On methods for assessing the performance of supply chains]. *Transport i logistika ustoychivogo razvitiya territoriy, biznesa, gosudarstva (drayvery rosta, trendy i bar'ery): materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 21 noyabrya 2024 goda* [Transport and logistics of sustainable development of territories, business, state (growth drivers, trends and barriers): proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 21, 2024]. Moscow: GUU Publ., 2025, pp. 188–191. (In Russian)

6. Afanasenko D. I. Upravlenie logisticheskoy tsep'yu kak set'yu [Managing the logistics chain as a network]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University]. 2009, Iss. 319, pp. 135–137. (In Russian)
7. Poleshchuk I. I., Gulyagina O. S. Logisticheskii potentsial tsepi postavok: ponyatie i pokazateli otsenki [Logistics potential of the supply chain: concept and assessment indicators]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D: Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series D: Economic and legal sciences]. 2014, Iss. 14, pp. 141–145. (In Russian)
8. Kulikova O. M., Suvorova S. D. Proektirovanie effektivnoy logisticheskoy tsepochnki postavok [Designing an efficient logistics supply chain]. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki* [Regional problems of economic transformation]. 2021, Iss. 4(126), pp. 122–129. (In Russian)
9. Maksimov A. M., Kudaybergen K. Zh. Stsenarnoe modelirovanie tsepochek postavok v transportno-logisticheskoy sisteme promyshlennogo kholdinga [Scenario modeling of supply chains in the transport and logistics system of an industrial holding]. *Nedropol'zovanie i transportnye sistemy* [Subsoil use and transport systems]. 2022, vol. 12, Iss. 2, pp. 25–37. (In Russian)
10. Zhukov A. O., Pestun U. A., Davidovich Yu. A. Razrabotka modeli klyuchevykh zadach dlya otsenki i prognozirovaniya effektivnosti proizvodstvennykh i transportno-logisticheskikh tsepochek v zadannykh usloviyakh [Development of a model of key tasks for assessing and predicting the efficiency of production and transport and logistics chains under given conditions]. *Strategicheskoe planirovanie i razvitie predpriyatiy: materialy XXI Vserossiyskogo simpoziuma, Moskva, 10–11 noyabrya 2020 goda* [Strategic planning and enterprise development: proceedings of the XXI All-Russian Symposium, Moscow, November 10–11, 2020]. Moscow: TsEMI RAN Publ., 2020, pp. 680–681. (In Russian)
11. Demchenko A. I. Protsessno-orientirovannye podkhody k proektirovaniyu i modelirovaniyu logisticheskikh tsepey [Process-oriented approaches to designing and modeling logistics chains]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i menedzhment* [Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and management]. 2014, vol. 8, Iss. 4, pp. 169–178. (In Russian)
12. Zhuk M. A., Tsyganova I. A. Modelirovanie sistemy podderzhki optimizatsii logisticheskikh tsepochek postavok [Modeling a support system for optimizing logistics supply chains]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments]. 2016, Iss. 12, pp. 104–108. (In Russian)
13. Korablev Yu. A. Imitatsionnoe modelirovanie: uchebnik [Simulation modeling: textbook]. Moscow: KNORUS Publ., 2017, pp. 10–11. (In Russian)
14. Belov A. G., Moiseev S. A., Grigor'ev A. V. Metody imitatsionnogo modelirovaniya [Methods of simulation modeling]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]. 2014, vol. 1, pp. 277–279. (In Russian)
15. Malygina S. N., Neupokoeva E. O. Obzor sovremennykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya [Review of modern simulation tools]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the RAS. Series: Technical sciences]. 2022, vol. 13, Iss. 2, pp. 134–143. (In Russian)

Received: October 20, 2025

Accepted: November 19, 2025

Author's information:

Elena V. PAKULINA — Senior Lecturer;
elena_pakulina29@mail.ru

УДК 624.048

Математическое моделирование односводчатой станции метрополитена в объемной постановке

А. П. Ледяев, А. Н. Коньков, А. А. Сокорнов

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

Для цитирования: Ледяев А. П., Коньков А. Н., Сокорнов А. А. Математическое моделирование односводчатой станции метрополитена в объемной постановке // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 906–915. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-906-915

Аннотация

Цель: Моделирование узла сопряжения участка односводчатой станции с торцевой стеной, эскалаторным и перегонными тоннелями в объемной постановке. **Методы:** Математическое моделирование методом конечных элементов. **Результаты:** В процессе исследования была создана объемная модель, включающая в себя грунтовый массив, обделку станции, опорные тоннели, торцевую стену, обделки перегонных и эскалаторного тоннеля. Установлено, что в зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива и способа расчета характеристик интерфейсных элементов деформации станционной обделки и напряжения в блоках могут отличаться в 1,5–2 раза. Уменьшение коэффициентов жесткости интерфейсных элементов приводит к увеличению деформаций и к снижению напряжений в элементах обделки. Таким образом, расчеты на максимальные деформации и максимальные напряжения целесообразно выполнять параллельно друг другу, используя разные характеристики интерфейсных элементов. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования односводчатых станций с применением сборной блочной обделки.

Ключевые слова: Метрополитен, односводчатая станция, математическое моделирование, метод конечных элементов, МКЭ.

Введение

Односводчатые станции метрополитена, сооружаемые закрытым способом, начали получать распространение в зарубежном метростроении с начала XX в. Большое количество односводчатых станций построено в Париже, Бостоне, Мадриде, Риме, Вашингтоне, Лиссабоне, Токио и других крупных городах. В 1970 г. на основе разработок, проведенных в ЦНИИСе, а также результатов физического моделирования на кафедре «Тоннели и метрополитены» ЛИИЖТа под руководством доктора технических наук, профессора Ю. А. Лиманова в сотрудничестве со специалистами Ленметростроя и Ленметрогипротранса была обоснована конструкция одно-

сводчатой станции для условий Ленинградского метрополитена. В настоящее время в Петербургском метрополитене эксплуатируется 14 односводчатых станций [1].

С точки зрения статической работы конструкция типового участка односводчатой станции представляет собой свод, опертый на массивные опоры, и замыкающий сечение обратный свод. В первом приближении расчетная схема такой конструкции может включать только верхний свод — криволинейный стержень на шарнирных либо жестких опорах, воспринимающий заданные нагрузки [2, 3].

Более точными и объективными являются модели, рассматривающие всю систему «свод —

опоры — обратный свод — грунтовый массив». Такая задача может быть решена как методом Метрогипротранса [4], заменяя грунтовый массив отдельными упругими опорами, так и методом конечных элементов с более детальным заданием физико-механических характеристик грунта [5, 6]. Современные расчетные комплексы, реализующие метод конечных элементов, позволяют выполнять оценку напряженно-деформированного состояния обделки и вмещающего ее грунтового массива на всех этапах раскрытия выработки [7–9]. Объемная постановка задачи позволяет выполнять прогноз изменения напряженно-деформированного состояния системы «обделка — грунтовый массив» с учетом опережения отдельных участков проходческих работ [10]. Но следует отметить, что все приведенные примеры, а также исследования [11–13] рассматривали именно типовой участок односводчатых станций, в то время как сложный узел сопряжения станционной обделки, торцевой стены, эскалаторного и перегонных тоннелей — исследован не так досконально.

Во многом это объясняется тем, что до недавнего времени расчеты таких сложных систем были ограничены возможностями программных комплексов и мощностями компьютерной техники.

Совершенствование инструментов математического моделирования позволило выполнять расчеты целых станционных комплексов, как например, в работе [14]. Вместе с тем особенность конструкций односводчатых станций Петербургского метрополитена, а именно большое количество шарнирных соединений сборных элементов, приводит к неизбежному усложнению модели. Жесткие соединения конечных элементов не в полной мере будут отражать реальную статическую работу конструкции, где отдельные элементы имеют возможность смещаться относительно друг друга.

Целью настоящего исследования являлось моделирование узла сопряжения участка одно-

сводчатой станции с торцевой стеной, эскалаторным и перегонными тоннелями в объемной постановке.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

- создание объемной модели, включающей в себя грунтовый массив, обделку станции, опорные тоннели, торцевую стену, обделки перегонных и эскалаторного тоннеля;
- анализ напряженно-деформированного состояния станционных конструкций в зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива;
- анализ напряженно-деформированного состояния станционных конструкций в зависимости от способа расчета характеристик интерфейсных элементов в стыках сборных элементов конструкций.

Материалы и методы

Исследование проводилось на примере односводчатой станции Петербургского метрополитена с островной платформой шириной 11,7 м. Обделка свода станции состоит из 14 обычных и 1 распорного блока; высота блоков — 0,7 м, ширина — 0,5 м. Обделка обратного свода станции состоит из 10 обычных и 1 распорного блока; высота блоков — 0,4 м, ширина — 1,0 м. Опирающие блоки свода и обратного свода — шарнирные, через винипластовые прокладки. Размеры поперечного сечения станции ~ 25 м по ширине и ~ 13,3 м по высоте (рис. 1). Свод и обратный свод передают нагрузку от горного давления на монолитные опоры, сооруженные в опорных тоннелях.

Доступ на платформу осуществляется от эскалатора, примыкающего к торцу станции, по двухмаршевой лестнице. Обделка эскалаторного тоннеля сопрягается с монолитным бетонным оголовком и примыкает к торцевой стене станции толщиной 1,0 м.

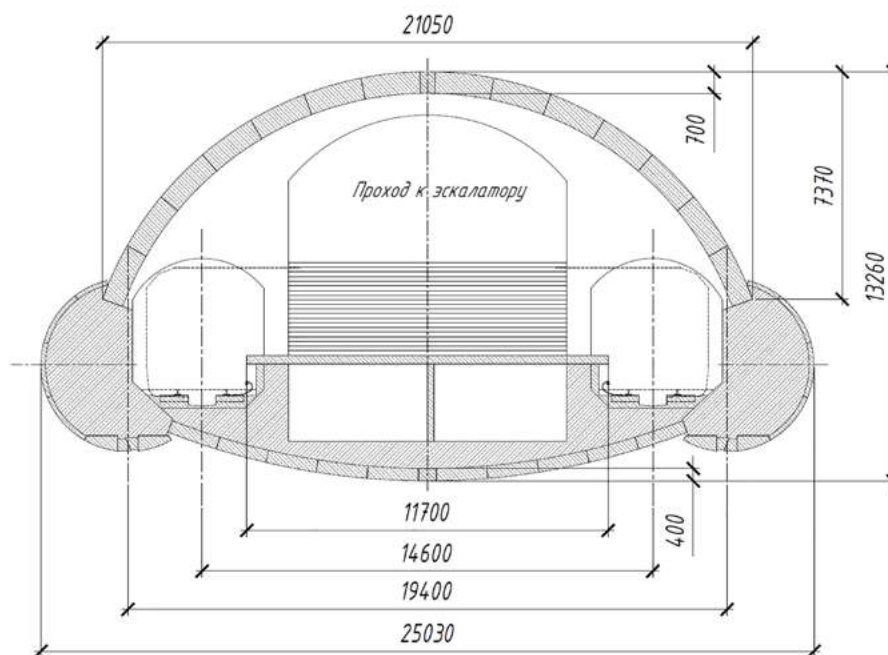


Рис. 1. Поперечное сечение станции

Глубина заложения шельги свода станции составляет 58 м от дневной поверхности. В геологическом строении рассматриваемой территории принимают участие породы, представленные комплексом четвертичных отложений различного генезиса, залегающие на котлинском горизонте венда верхнекотлинской подсвиты.

Статический расчет тоннеля выполнен в объемной постановке в программном комплексе Midas GTS NX, реализующем метод конечных элементов.

Моделируемая область грунтового массива над шельгой ограничена высотой 24 м (мощностью протерозойских глин), вес вышележащих слоев грунта моделируется равномерно распределенной нагрузкой, определенной как вес вышележащих грунтов, и был принят равным 680 кПа.

Размеры модели по ширине составляют 80 м, по высоте — 50 м. Длина модели складывается из 10 м станционного участка (включая торцевую стену) и 10 м участка эскалаторного и перегонного тоннелей. Общий вид модели представлен на рис. 2.

Расчеты выполнялись для двух геомеханических моделей грунтового массива — Мора — Кулона и модели упрочняющегося грунта (*Hardening Soil, HS*). В модели *Hardening Soil* возможно учесть пластическую работу грунта, предшествующую его разрушению. Помимо этого, деформирование грунта при нагружении и разгрузке выполняется по разным ветвям (с разными модулями упругости).

Физико-механические свойства конечных элементов приведены в табл. 1.

Обделка станции моделировалась объемными конечными элементами из отдельных блоков. Обделка опорных тоннелей и монолитный бетон опор моделировались едиными телами.

Общий вид станционной обделки показан на рис. 3, а общий вид узла сопряжения строительных конструкций — на рис. 4.

Для учета независимой работы шарнирно опертых блоков в стыки между ними были введены линейные интерфейсные элементы, моделирующие работу винипластовых прокладок, — разрывы в сетках конечных элементов,

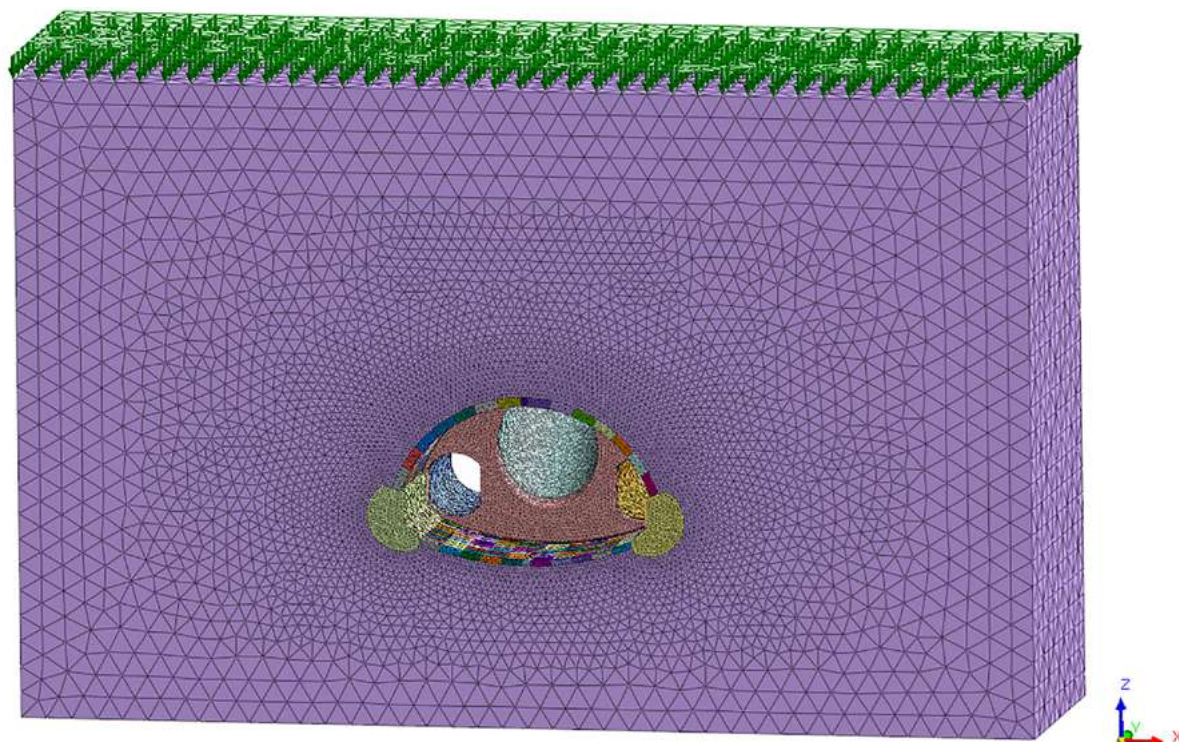


Рис. 2. Общий вид модели

Таблица. 1. Физико-механические характеристики материалов

Характеристика	Грунтовый массив		Обделка станции и опорные тоннели (бетон М400)	Обделка перегонных тоннелей (бетон М600)	Обделка эскалаторного тоннеля (чугун СЧ21-40)
Механическая модель	Мора — Кулона	Hardening Soil	Elastic		
Объемный вес γ , кН/м ³	21	21	24,5	24,5	76,5
Модуль упругости E , МПа	—	—	32 500	37 000	110 000
Секунный модуль упругости E_{50} , МПа	200	200	—	—	—
Модуль разгрузки E_{ur} , МПа	—	600	—	—	—
Коэффициент Пуассона ν	0,23	0,23	0,2	0,2	0,22
Референтное давление P_{ref} , кПа	—	1200	—	—	—
Коэффициент разрушения R_f	—	0,9	—	—	—
Степенной показатель жесткости m	—	0,5	—	—	—
Угол внутреннего трения ϕ , град.	23	23	—	—	—
Сцепление C , кПа	500	500	—	—	—

заполненные виртуальными связями. Работу этих элементов описывают K_n и K_t — нормальный и касательный модули жесткости интерфейсного элемента, кПа.

В нашем случае отсутствие связей допускает перемещение блока в стыке по касательной к другому блоку, тем самым принимаем $K_t = 1$ кН/м³ (минимальное отличное от нуля значение).

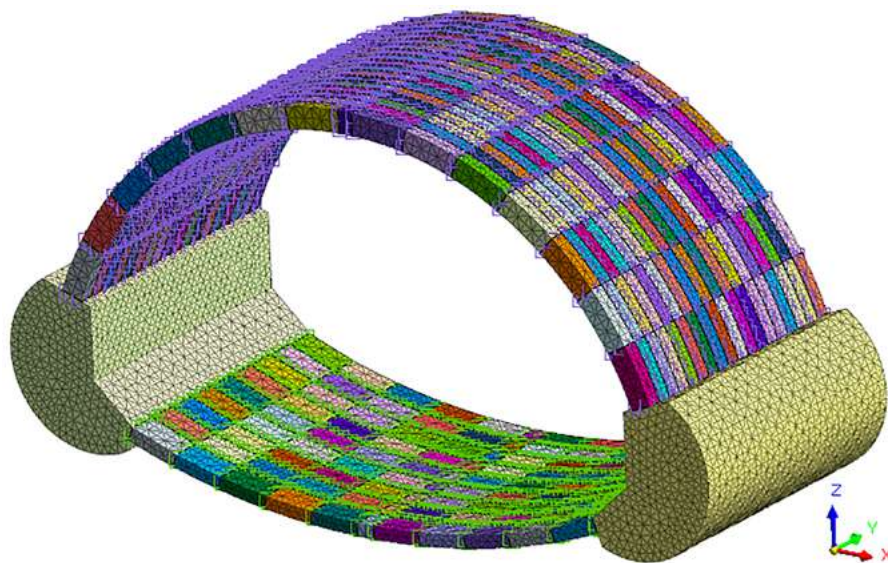


Рис. 3. Общий вид моделируемой стационарной обделки (в стыках блоков показаны интерфейсы)

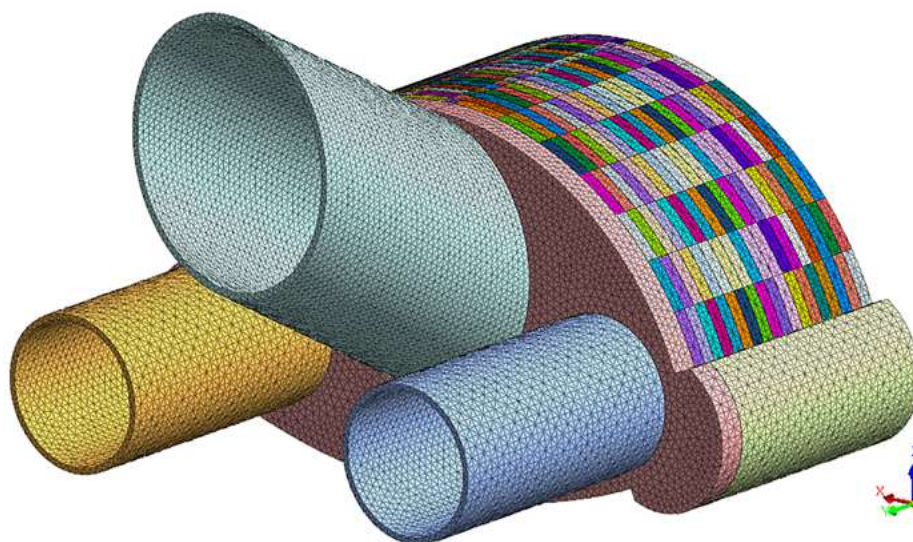


Рис. 4. Общий вид узла сопряжения строительных конструкций

Нормальный модуль жесткости K_n можно определить двумя способами, как было показано в исследовании [15].

В первом способе (в соответствии с рекомендациями программного комплекса) нормальный модуль жесткости определяется через модуль упругости контактирующих элементов и составляет $\sim 27\,000\text{ МН/м}^3$.

Во втором способе модуль жесткости определяется из предположения разрушения бетона на контакте соприкасающихся поверхностей:

$$K_n = N / (\Delta A),$$

где N — нормальная сила в стыке, кН;
 Δ — деформация обделки в стыке, м;
 A — площадь стыка, м.

В идеальном случае деформация бетона Δ является незначительной, поскольку напрямую зависит от модуля деформации бетона и в нашем случае оказывается равной микрометрам. В действительности при деформировании обделки на контакте стыков может происходить локальное

разрушение и истирание бетона. Приняв такое возможное разрушение равным 1 мм на каждый блок, можно определить нормальный модуль жесткости равным $\sim 16\,000\text{ МН/м}^3$.

На первом этапе расчета рассматривался однородный грунтовый массив под нагрузкой от вышележащих грунтов для создания начального поля напряжений. При этом всем конечным элементам присваивались характеристики грунта. По результатам расчета первого этапа все перемещения обнулялись.

На втором этапе расчета моделировалось возведение подземных сооружений. Следует отметить, что конструкции станционного комплекса в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга работают в режиме заданных нагрузок (то есть рассчитаны на восприятие давления от всей толщи вышележащих грунтов), поэтому при математическом моделировании эффекты разгрузки массива при деформировании незакрепленных выработок не учитывались.

Результаты расчета

По результатам выполненных расчетов определено напряженно-деформированное состояние станционных конструкций и проведена оценка их несущей способности.

По результатам анализа деформаций конструкций (рис. 5) было установлено, что блоки в верхнем и обратном своде обладают шарнирной подвижностью, что вызывает смещения сводов на величину от 20 до 49 мм в зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива и способа расчета характеристик интерфейсных элементов.

В зависимости от применяемой геомеханической модели грунтового массива и способа расчета характеристик интерфейсных элементов не только деформации станционной обделки, но и напряжения в блоках могут отличаться в 1,5–2 раза (табл. 2). При этом наблюдаются следующие закономерности:

– применение модели Мора — Кулона приводит к возникновению больших значений дефор-

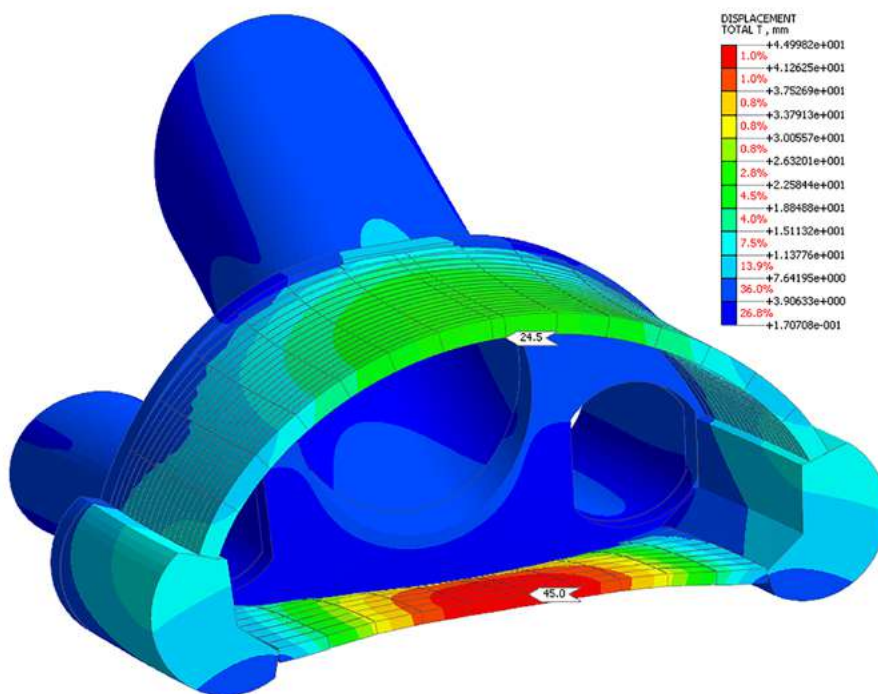


Рис. 5. Вертикальные деформации конструкций (для наглядности увеличены в 50 раз)

Таблица. 2. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния станционной обделки

Геомеханическая модель грунта	Тип интерфейсов			
	Мора — Кулона		Hardening Soil	
	автоматические	настраиваемые	автоматические	настраиваемые
Деформации шельги свода, мм	–24	–31	–19	–24
Деформации обратного свода, мм	45	49	20	21
Вертикальная эллиптичность, мм	69	80	39	45
Максимальные напряжения в блоках свода, МПа	15,6	13,3	13,4	10,7
Максимальные напряжения в блоках обратного свода, МПа	22,8	14,0	16,0	10,4

маций и напряжений по сравнению с моделью Hardening Soil;

– уменьшение коэффициентов жесткости интерфейсных элементов («настраиваемые интерфейсы») приводит к увеличению деформаций и к снижению напряжений в элементах обделки.

Заключение

В настоящем исследовании выполнен расчет одного ключевого узлового элемента станции с высокой степенью детализации, что позволяет детально проанализировать локальные напряженно-деформированные процессы. Вместе с тем важно подчеркнуть, что целостная оценка надежности и устойчивости сооружения требует комплексного рассмотрения всех конструктивных элементов и их взаимного влияния в рамках полной модели станции метрополитена.

Выводы

1. Все расчеты выполнены с учетом требований первой и второй групп предельных состояний, что обеспечивает полноту инженерной оценки надежности и долговечности конструкции.

2. Для моделирования грунтов применялись две модели: классическая модель Мора — Кулона и современная модель Hardening Soil, адаптированные к региональным особенностям Санкт-Петербурга.

3. Разброс результатов деформаций и напряжений в пределах 15–20 % обусловлен различиями

в физических предположениях моделей и сложностью инженерно-геологических условий, при этом измерения напряжений учитывали отсутствие концентраций на опорных блоках.

4. Модель Hardening Soil признана более эффективной и универсальной для моделирования грунтовых условий Санкт-Петербурга благодаря учету нелинейного упрочнения, различий при нагружении и разгрузке грунтов, что делает ее более надежным инструментом по сравнению с классической и модифицированной моделью Мора — Кулона.

Выполненное исследование вносит существенный вклад в развитие методического обеспечения расчетов подземных сооружений и помогает закрепить практическую позицию о допуске вариативности в вопросе сходимости альтернативных инженерных расчетов в сложных инженерно-геологических условиях при научно-техническом сопровождении.

Список источников

1. Кунец Д. В. Обеспечение эксплуатационной надежности конструкций, встроенных в односводчатые станции Петербургского метрополитена: дисс. ... канд. техн. наук: специальность 05.23.11 / Д. В. Кунец. — СПб., 2015. — 164 с.
2. Краев Ю. К. Оптимизация жесткости арки-фермы, применяемой при строительстве станций Екатеринбургского метрополитена / Ю. К. Краев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2009. — № 8. — С. 54–55.

3. Бильченко А. В. Обоснование выбора конструкции односводчатой станции при строительстве метрополитенов методом сквозной проходки / А. В. Бильченко, В. А. Голеско, А. С. Холодцова // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2012. — Т. 3. — С. 355–364.
 4. Краев Ю. К. Двухъярусный пересадочный узел в перспективе строительства станции «Театральная» Екатеринбургского метрополитена / Ю. К. Краев, Е. А. Ривкина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2009. — № 2. — С. 63–65.
 5. Кунец Д. В. Математическое моделирование деформированного состояния конструкций односводчатых станций метрополитена / Д. В. Кунец // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2009. — № 8. — С. 49–53.
 6. Фролов Ю. С. Особенности статической работы обделки и встроенных конструкций односводчатых станций Санкт-Петербургского метрополитена в процессе длительной эксплуатации / Ю. С. Фролов, А. Н. Коньков, Д. В. Кунец // Промышленное и гражданское строительство. — 2011. — № 5. — С. 27–29.
 7. Шэнь Ц. Обоснование конструктивно-технологических решений при строительстве односводчатых станций метрополитена в малопрочных скальных грунтах / Ц. Шэнь, Ю. С. Фролов // Подземные горизонты. — 2019. — № 22. — С. 28–32.
 8. Шэнь Ц. Решение геомеханических задач при стадийной технологии раскрытия выработок большого пролета в малопрочных скальных грунтах / Ц. Шэнь, Ю. С. Фролов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». — 2019. — № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS319.pdf> (дата обращения: 28.09.2021). — DOI: 10.15862/14SATS319.
 9. Фролов Ю. С. Влияние методов поэтапного раскрытия выработки большого пролета на напряженно-деформированное состояние системы «крепь — грунтовый массив» / Ю. С. Фролов, Ц. Шэнь // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 1(48). — С. 73–83.
 10. Фролов Ю. С. Прогноз геомеханических процессов при сооружении станции метрополитена в скальных грунтах / Ю. С. Фролов, Ц. Шэнь // Путевой навигатор. — 2020. — № 44(70). — С. 50–59.
 11. Yang X. Research on prefabricated metro station structure and key assembly technologies / X. Yang, F. Lin // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2024. — Vol. 153. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106029.
 12. Gao D. Failure mechanism of deep-buried and large cross-section subway station tunnel: Geo-mechanical model test and numerical investigation / D. Gao, Y. Shen, P. Zhou, A. Gou et al. // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2025. — Vol. 155, Part 1. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106148.
 13. Haixiang L. Support mechanical response analysis and surrounding rock pressure calculation method for a shallow buried super large section tunnel in weak surrounding rock / L. Haixiang, W. Xiuying, T. Zhongsheng, Z. Jinpeng et al. // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. — DOI: 10.1038/s41598-024-64522-6.
 14. Sehnalova P. Metro Station Pankrac — Modelling and Analysis in Midas GTS NX / P. Sehnalova, M. Urbanikova. — URL: <https://resource.midasuser.com/en/blog/geotech/metro-station-pankrac#complicated> (дата обращения: 28.09.2021).
 15. Ледяев А. П. Математическое моделирование блочной обделки тоннеля большого диаметра / А. П. Ледяев, А. А. Сокольников, А. Н. Коньков // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 605–615. — DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615.
- Дата поступления: 27.09.2025
Решение о публикации: 17.10.2025
- Контактная информация:**
ЛЕДЯЕВ Александр Петрович — д-р техн. наук, проф.; ledyaev@pgupstm.ru
СОКОРНОВ Антон Александрович — ст. преподаватель; scarlunch@mail.ru
КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доц.; anlonkov@pgupstm.ru

Three-Dimensional Mathematical Model of a Single-Vault Metro Station

A. P. Ledyayev, A. N. Konkov, A. A. Sokornov

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

For citation: Ledyayev A. P., Konkov A. N., Sokornov A. A. Three-Dimensional Mathematical Model of a Single-Vault Metro Station // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 906–915. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-906-915

Summary

Purpose: To model the junction of a single-vault station segment with a diaphragm wall, escalator and interstation tunnels using a three-dimensional framework. **Methods:** Mathematical modelling by the finite element method. **Results:** A comprehensive three-dimensional model has been created, incorporating the ground massive, station lining, support tunnels, and a diaphragm wall, as well as the linings of the interstation and escalator tunnels. The analysis has revealed that the deformations of the station lining and the stresses in the blocks vary by a factor of 1.5 to 2, depending upon the geomechanical model of the ground massive utilised and the approach taken to calculate the characteristics of the interface elements. Notably, a reduction in the stiffness coefficients of the interface elements results in increased deformations and a decrease in the stresses within the lining elements. Therefore, it is recommended to conduct calculations for maximum deformations and maximum stresses concurrently, applying various characteristics of the interface elements. **Practical significance:** The findings of the study can be applied during the design phase of single-vault stations with prefabricated block lining.

Keywords: Metro, single-vault station, mathematical modelling, finite elements method, FEM.

References

1. Kunets D. V. *Obespechenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti konstruktsiy, vstroennykh v odnosvodchatye stantsii Peterburgskogo metropolitena*: diss. ... kand. tekhn. nauk: spetsial'nost' 05.23.11 [Ensuring operational reliability of structures integrated into single-arch stations of the St. Petersburg Metro: diss. ... Cand. Tech. Sci., speciality 05.23.11]. St. Petersburg, 2015, 164 p. (In Russian)
2. Kraev Yu. K. Optimizatsiya zhestkosti arki fermy, primenyaemoy pri stroitel'stve stantsiy Ekaterinburgskogo metropolitena [Optimization of truss arch stiffness used in the construction of Yekaterinburg Metro stations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2009, Iss. 8, pp. 54–55. (In Russian)
3. Bil'chenko A. V., Golesko V. A., Kholodtsova A. S. Obosnovanie vybora konstruktsii odnosvodchatoy stantsii pri stroitel'stve metropolitenov metodom skvoznoy prokhodki [Justification of the choice of single-arch station design in metro construction using the through tunneling method]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and Research in the Transport Complex]. 2012, vol. 3, pp. 355–364. (In Russian)
4. Kraev Yu. K., Rivkina E. A. Dvukh'yarusnyy persadochnyy uzel v perspektive stroitel'stva stantsii "Teatral'naya" Ekaterinburgskogo metropolitena [Two-level transfer hub in the perspective of constructing the "Teatralnaya" station of the Yekaterinburg Metro]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2009, Iss. 2, pp. 63–65. (In Russian)
5. Kunets D. V. Matematicheskoe modelirovanie deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy odnosvodchatykh stantsiy metropolitena [Mathematical modeling of the deformed state of structures of single-arch metro stations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*

nal [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2009, Iss. 8, pp. 49–53. (In Russian)

6. Frolov Yu. S., Kon'kov A. N., Kunets D. V. Osobennosti staticheskoy raboty obdelki i vstroennykh konstruktivnykh stantsiy Sankt-Peterburgskogo metropolitena v protsesse dlitel'noy ekspluatatsii [Features of the static operation of lining and integrated structures of single-arch stations of the St. Petersburg Metro during long-term operation]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2011, Iss. 5, pp. 27–29. (In Russian)

7. Shen' Ts., Frolov Yu. S. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh resheniy pri stroitel'stve odnosvodchatykh stantsiy metropolitena v maloprochnykh skal'nykh gruntakh [Justification of structural and technological solutions in the construction of single-arch metro stations in low-strength rock soils]. *Podzemnye gorizonty* [Underground Horizons]. 2019, Iss. 22, pp. 28–32. (In Russian)

8. Shen' Ts., Frolov Yu. S. Reshenie geomekhanicheskikh zadach pri stadiynoy tekhnologii raskrytiya vyrabotok bol'shogo proleta v maloprochnykh skal'nykh gruntakh [Solving geomechanical problems in staged technology of opening large-span excavations in low-strength rock soils]. *Internet-zhurnal "Transportnye sooruzheniya"* [Online Journal "Transport Structures"]. 2019, Iss. 3. Available at: <https://t-s.today/PDF/14SATS319.pdf> (accessed: September 28, 2021). DOI: 10.15862/14SATS319. (In Russian)

9. Frolov Yu. S., Shen' Ts. Vliyanie metodov poetapnogo raskrytiya vyrabotki bol'shogo proleta na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy "krep' — gruntovyy massiv" [Influence of staged opening methods of large-span excavations on the stress-strain state of the "support — rock mass" system]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2019, Iss. 1(48), pp. 73–83. (In Russian)

10. Frolov Yu. S., Shen' Ts. Prognoz geomekhanicheskikh protsessov pri sooruzhenii stantsiy metropolitena v skal'nykh gruntakh [Forecast of geomechanical processes in the construction of metro stations in rock soils]. *Putevoy*

navigator [Track Navigator]. 2020, Iss. 44(70), pp. 50–59. (In Russian)

11. Yang X., Lin F. Research on prefabricated metro station structure and key assembly technologies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, vol. 153. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106029.

12. Gao D., Shen Y., Zhou P., Gou A. et al. Failure mechanism of deep-buried and large cross section subway station tunnel: Geo-mechanical model test and numerical investigation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025, vol. 155, part 1. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106148.

13. Haixiang L., Xiuying W., Zhongsheng T., Jinpeng Z. et al. Support mechanical response analysis and surrounding rock pressure calculation method for a shallow buried super large section tunnel in weak surrounding rock. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14. DOI: 10.1038/s41598-024-64522-6.

14. Sehnalova P., Urbankova M. Metro Station Pankrac — Modelling and Analysis in Midas GTS NX. Available at: <https://resource.midasuser.com/en/blog/geotech/metro-station-pankrac#complicated> (accessed: September 28, 2021).

15. Ledyayev A. P., Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Matematicheskoe modelirovanie blochnoy obdelki tonnelya bol'shogo diametra [Mathematical modeling of block lining of a large-diameter tunnel]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS, 2025, vol. 22, Iss. 3, pp. 605–615. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615. (In Russian)

Received: September 27, 2025

Accepted: October 17, 2025

Author's information:

Alexandr P. LEDYAEV — Dr. Sci in Engineering, Professor; ledyaev@pgupstm.ru

Alexandr N. KONKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; ankonkov@pgupstm.ru

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer; scarlunch@mail.ru

УДК 629.423.31

Применение нейронной сети для диагностики дефектов ротора асинхронного тягового электродвигателя на основе параметров магнитной индукции

М. Х. Вахидов, О. Р. Хамидов, Ш. Ш. Акбарова

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, Ташкент, Мирабадский район, улица Темирийолчилар, 1

Для цитирования: Вахидов М. Х., Хамидов О. Р., Акбарова Ш. Ш. Применение нейронной сети для диагностики дефектов ротора асинхронного тягового электродвигателя на основе параметров магнитной индукции // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 916–925. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-916-925

Аннотация

Цель: В статье представлен гибридный подход к диагностике технического состояния ротора асинхронного тягового электродвигателя, основанный на анализе параметров магнитной индукции. На основе экспериментальных данных, полученных в виде CSV-файла, построена модель на языке Python с применением искусственной нейронной сети. **Результаты:** Предварительная обработка включает нормализацию данных и спектральный анализ сигнала. Архитектура нейронной сети реализована с использованием Keras и включает два скрытых слоя. Модель обучена на наборе из 100 примеров и продемонстрировала высокую точность (до 98 %) на тестовых данных. Проведен сравнительный анализ характеристик магнитного поля для случаев с дефектами и без. Результаты показывают, что предложенный подход позволяет эффективно выявлять наличие трещин в роторе, минимизируя необходимость в сложных измерительных установках. **Практическая значимость:** Работа выполнена исключительно с использованием инструментов с открытым исходным кодом.

Ключевые слова: Асинхронный тяговый электродвигатель, магнитная индукция, нейронная сеть, диагностика дефектов ротора, спектральный анализ, Python, машинное обучение, техническая диагностика, CSV, предиктивное обслуживание.

Введение

В современных асинхронных тяговых электродвигателях одним из ключевых параметров, определяющих надежность и эффективность работы, является магнитная индукция в воздушном зазоре. Состояние ротора, особенно наличие трещин в короткозамкнутых стержнях, оказывает значительное влияние на распределение магнитного поля.

Такие дефекты нарушают симметрию магнитного поля и вызывают локальные искажения в амплитудно-фазовой структуре магнитной индукции, что, в свою очередь, снижает электро-

магнитный момент, уменьшает КПД и приводит к ухудшению теплового режима [1].

Современные методы диагностики требуют не только анализа экспериментальных данных, но и точного численного моделирования физических процессов. В данной работе предложен гибридный подход, основанный на использовании Python как основной среды моделирования. Математическая модель асинхронного двигателя реализована в виде системы дифференциальных уравнений, численно решаемой с применением библиотек NumPy, SciPy и TensorFlow.

Дополнительно для оценки состояния ротора используется искусственная нейронная сеть, обученная на наборах данных, содержащих информацию о магнитной индукции при различных сценариях повреждений. Такой подход позволяет осуществлять предиктивную диагностику ротора с высокой степенью точности, исключая необходимость применения специализированного лицензионного ПО [2].

Таким образом, представленная методология позволяет проводить полноценный анализ влияния трещин на магнитные параметры асинхронного двигателя средствами исключительно открытого программного обеспечения, что расширяет доступность и гибкость решений в области технической диагностики.

Постановка задачи и цель исследования

Асинхронные тяговые электродвигатели (АТЭД), используемые в локомотивной тяге, подвержены различным видам механических и электрических дефектов, среди которых трещины и замыкания в стержнях ротора являются одними из наиболее трудно диагностируемых. Эти повреждения приводят к изменению магнитного поля в воздушном зазоре, а следовательно, и к изменению распределения магнитной индукции. Одним из наиболее чувствительных параметров к такого рода дефектам является магнитная индукция $B(t)$ в воздушном зазоре, особенно в области ротора [3].

Целью настоящего исследования является разработка численной модели, позволяющей оценить влияние трещин в роторной обмотке на временную и частотную структуру магнитной индукции, а также сравнительный анализ этих изменений на основе ряда количественных показателей. Особое внимание уделяется интегральной метрике изменения магнитной активности — энергии магнитного поля в зазоре. В основе методики лежит вычис-

ление мгновенной энергии магнитного поля W за интервал времени T по формуле:

$$W_B = \int_0^T \frac{B^2}{2\mu_0} dt, \quad (1)$$

где $B(t)$ — мгновенное значение магнитной индукции, полученное моделированием;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная;

T — интервал анализа (в нашем случае 0,02 с).

Для оценки влияния дефекта на энергетические характеристики магнитного поля вводится **коэффициент относительного изменения энергии**:

$$\eta = \frac{W_B^{\text{деф}} - W_B^{\text{и}}}{W_B^{\text{и}}} 100 \%, \quad (2)$$

где $W_B^{\text{деф}}$ — энергия магнитного поля для ротора с дефектом;

$W_B^{\text{и}}$ — энергия магнитного поля для исправного ротора.

Поставленная задача реализуется через численное моделирование магнитной индукции на основе Python-скрипта с дискретным представлением сигнала $B(t)$, рассчитанного в 1000 временных точках. Для численного интегрирования используется метод трапеций:

$$W_B \approx \sum_{i=1}^{n-1} \frac{B_i^2 + B_{i+1}^2}{2\mu_0} \Delta t, \quad (3)$$

где Δt — шаг по времени;

n — число временных отсчетов.

Таким образом, исследование направлено на количественную оценку изменений магнитной энергии при наличии дефектов ротора, сравнение энергетических характеристик различных случаев, выявление диагностических признаков, пригодных для реализации с помощью нейронных сетей [4].

Методика моделирования

Для исследования влияния дефектов типа продольных трещин в роторной обмотке асинхронного тягового электродвигателя на изменение

магнитной индукции была разработана методика численного моделирования на языке программирования Python. В рамках методики выполняются следующие ключевые этапы.

Исходные данные и структура модели

В качестве входных данных использовались величины магнитной индукции, полученные в процессе измерений или численного расчета на различных временных интервалах. В исследовании данные были импортированы из CSV-файла в виде временного ряда. CSV является широко используемым текстовым форматом для хранения табличных данных, где значения разделяются запятой или другим символом-разделителем. Применение данного формата удобно для диагностики тяговых асинхронных электродвигателей локомотивов, так как он позволяет хранить и обрабатывать большие объемы экспериментальных измерений простым и эффективным образом. На основе этих данных был выполнен спектральный анализ, что позволило выявить частотные составляющие магнитного поля [5].

При моделировании временной динамики магнитной индукции $B(t)$ была применена математическая функция синусоидальной формы, что позволяет отразить основные колебательные характеристики процесса:

$$B(t) = B_0 \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (4)$$

где B_0 — амплитудное значение магнитной индукции;

f — частота сигнала (в Гц);

φ — фазовый сдвиг (в радианах);

t — время (в секундах).

При моделировании временной динамики магнитной индукции $B(t)$ мы использовали функцию синусоидальной формы. Следует отметить, что для более детального анализа изменений индукции дополнительно рассчитывалась ее производная по времени. Это позволило получить

представление о скоростных характеристиках магнитного поля и выявить некоторые особенности его динамики:

$$\frac{dB(t)}{dt} = 2\pi f B_0 \cos(2\pi f t + \varphi). \quad (5)$$

Данное значение дает возможность оценить скорость изменения магнитной индукции, что имеет важное значение при анализе электромагнитных процессов в двигателе. Для дальнейшего исследования сигнал был подвергнут быстрому преобразованию Фурье (БПФ) с целью получения его амплитудного спектра:

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j 2\pi f n / N}, \quad (6)$$

где x_n — дискретные значения сигнала;

N — общее количество точек;

f — частота;

j — мнимая единица.

Сравнение амплитудных спектров исправного и дефектного состояний позволило выявить характерные изменения, указывающие на наличие трещин. Анализ был реализован с использованием языка программирования Python, что обеспечило гибкость при обработке и визуализации экспериментальных данных. В работе применялись библиотеки pandas, numpy, matplotlib, а также модуль scipy.fft для спектрального анализа. На первом этапе данные о временной зависимости магнитной индукции были загружены из CSV-файла и преобразованы в структуру DataFrame, после чего выполнена фильтрация и очистка от выбросов и пропусков [6]. Далее осуществлялось численное дифференцирование сигнала, что позволило оценить его динамику и выявить резкие изменения, связанные с дефектами ротора. Для наглядности строились графики временной зависимости магнитной индукции и ее производной. Заключительным этапом стало применение быстрого преобразования Фурье, позволив-

шего перейти из временной области в частотную и выявить характерные спектральные компоненты сигнала. Построение амплитудного спектра обеспечило возможность наглядного сравнения нормального и дефектного состояний ротора.

Данная методика обеспечивает количественную и качественную оценку изменения магнитной индукции, что важно для последующего построения модели диагностики технического состояния асинхронного тягового электродвигателя. Для оценки различий между случаями с дефектом и без дефекта используются следующие показатели [7]:

- среднеквадратичное значение магнитной индукции;
- частотное распределение амплитудных составляющих;
- коэффициент гармонических искажений (THD).

$$B_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B(t)^2 dt}. \quad (7)$$

Для демонстрации процесса работы нейронной сети рассмотрим одну конкретную запись из исходного датасета в табл. 1.

Этап 1. Нормализация признаков. Перед подачей в нейронную сеть данные были нормализованы по следующей формуле:

$$x_{\text{норм}} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (8)$$

где μ и σ — среднее значение и стандартное отклонение по каждому столбцу, рассчитанные на обучающей выборке. Предположим, для признака B_{max} среднее значение и стандартное отклонение были следующими [8]:

$$\mu_B = 1,25, \quad \sigma_B = 0,10. \quad (9)$$

Тогда нормализованное значение будет:

$$x_b^{\text{норм}} = \frac{1,2745 - 1,25}{0,10} = 0,245. \quad (10)$$

Аналогично нормализуются и остальные 4 признака. В результате получается вектор нормализованных входных данных:

$$\vec{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]. \quad (11)$$

Этап 2. Прямой проход (forward pass). Входной вектор подается в первый скрытый слой, состоящий из 32 нейронов. Каждый нейрон считает линейную комбинацию:

$$z_j^{(1)} = \sum_{i=1}^5 \omega_{ij}^{(1)} x_i + b_j^{(1)}, \quad (12)$$

далее применяется функция активации ReLU:

$$a_j^{(1)} = \text{ReLU}(z_j^{(1)}) = \max(0, z_j^{(1)}). \quad (13)$$

Результаты передаются на второй скрытый слой (16 нейронов), где повторяется операция:

$$z_k^{(2)} = \sum_{j=1}^{32} \omega_{jk}^{(2)} a_j^{(1)} + b_k^{(2)}, \quad (14)$$

и снова применится ReLU.

Этап 3. Выходной слой и классификация. На выходном слое один нейрон:

$$z = \sum_{k=1}^{16} \omega_k^{(3)} a_k^{(2)} + b^{(3)}. \quad (15)$$

После чего применяется сигмоидальная функция активации:

$$\hat{y} = \sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}. \quad (16)$$

Если $\hat{y} < 0,5$, система классифицирует сигнал как «СОГЛАСНЫЙ» (исправный ротор), если $\hat{y} \geq 0,5$ — как «С ДЕФЕКТОМ» (трещина в роторе). Для данной строки метка $y = 0$. Допустим, модель вернула $y = 0,042$, что меньше 0,5 — результат корректный [9].

Этап 4. Обновление весов (в процессе обучения). Если бы модель ошиблась, производилась бы корректировка весов методом обратного распространения ошибки (backpropagation), исполь-

Таблица 1. Пример записи из исходного датасета для демонстрации работы нейронной сети

№	B_{dmax}	I_{rms}	ω	A_1	A_2	Метка
1	1,274507123	6,963089	327,9936	0,055567	0,008248	0
2	1,179260355	7,454708	323,2463	0,028976	0,013555	0
3	1,297153281	5,800716	314,5963	0,023636	0,007076	0
4	1,428454478	6,781485	307,5306	0,039933	0,01192	0
5	1,164876994	6,174679	320,9822	0,036596	-0,00394	0
6	1,164879	6,256437	317,9349	0,030935	0,017133	0
7	1,436882	6,203803	322,9519	0,053928	0,015012	0
8	1,315115	6,068005	320,3517	0,059106	0,006829	0
9	1,129579	6,524261	324,4955	0,041768	0,021592	0
10	1,281384	6,084525	308,6476	0,069551	0,024376	1
11	1,130487	6,635228	327,1739	0,017166	-0,00108	0
12	1,130141	6,474881	315,976	0,036127	0,007373	0
13	1,236294	6,380526	334,7526	0,025664	0,007309	0
14	0,913008	6,046218	307,1081	0,002669	0,005601	0
15	0,941262	6,211614	331,3596	0,038346	0,023295	0
16	1,115657	6,877696	315,9791	0,037565	0,013062	0
17	1,048075	6,750459	307,4858	0,070269	0,012355	1
18	1,247137	6,011222	309,1611	0,052616	-0,00504	0
19	1,063796	6,549666	310,7965	0,019516	0,021354	0
20	0,988154	6,875694	318,2417	0,077082	0,002607	1
21	1,419847	5,665297	319,2284	0,064421	0,015599	1
22	1,166134	6,77168	308,263	0,051642	0,017774	0
23	1,210129	6,168688	313,7565	0,03547	0,028607	1
24	0,986288	6,785299	335,4227	0,020811	0,001912	0
25	1,118343	6,11837	331,2754	0,032556	-0,0152	0
26	1,216638	5,597559	318,3632	0,061775	0,016838	1
27	1,027351	5,686229	314,38	0,077692	0,033005	1
28	1,256355	6,524042	315,2003	0,070865	0,027389	1
29	1,109904	6,629861	320,1352	0,030223	0,017097	0
30	1,156246	6,047842	303,7721	0,017608	0,010084	0

зую градиенты функции потерь binary cross-entropy:

$$\mathcal{L} = -y \log(\hat{y}) - (1 - y) \log(1 - \hat{y}). \quad (17)$$

Для текущего примера:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= -0 \cdot \log(0,042) - (1 - 0) \cdot \log(1 - 0,042) \approx \\ &\approx -\log(0,958) \approx 0,0426. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, модель правильно интерпретировала сигналы магнитной индукции и спрогнозировала отсутствие дефекта в роторе. Подобная операция выполняется по каждому примеру

выборки в процессе обучения и тестирования модели.

Результаты и обсуждение

В рамках данного исследования была реализована нейросетевая модель на языке Python для классификации состояния ротора асинхронного двигателя по данным магнитной индукции в воздушном зазоре, а также токам и гармоническим составляющим. Исходные данные были получены из экспериментального CSV-файла, содер-

```

# 1. Импорт необходимых библиотек
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.metrics import confusion_matrix, classification_report
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense

# 2. Загрузка данных из CSV-файла
df = pd.read_csv("rotor_fault_data.csv")
print("Первые 5 строк:")
print(df.head())

# 3. Разделение признаков (X) и меток (y)
X = df.drop("label", axis=1).values
y = df["label"].values

# 4. Нормализация входных данных
scaler = StandardScaler()
X = scaler.fit_transform(X)

# 5. Разделение на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.2, random_state=42
)

# 6. Создание архитектуры нейронной сети
model = Sequential()
model.add(Dense(32, input_dim=X.shape[1],
    activation='relu'))
model.add(Dense(16, activation='relu'))
model.add(Dense(1, activation='sigmoid')) # Двоичный выход

# 7. Компиляция модели
model.compile(optimizer='adam', loss='binary_crossentropy',
    metrics=['accuracy'])

# 8. Обучение модели
history = model.fit(
    X_train, y_train,
    epochs=50,
    batch_size=16,
    validation_split=0.2,
    verbose=1
)

# 9. Оценка точности модели на тестовой выборке
loss, accuracy = model.evaluate(X_test, y_test)
print(f"Точность на тестовых данных: {accuracy:.2f}")

# 10. Визуализация метрик обучения
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(history.history['accuracy'], label='Обучающая
    точность')
plt.plot(history.history['val_accuracy'], label='Валидационная
    точность')
plt.xlabel("Эпоха")
plt.ylabel

```

Рис. 1. Kod Python

жащего 50 записей, каждая из которых включает следующие параметры: максимальное значение магнитной индукции в зазоре B_{max} , действующее значение тока I_1 , угловая скорость ω , амплитуда первой и второй гармоник, $\text{harm}_{1\text{amp}}$, $\text{harm}_{2\text{amp}}$, метка состояния (0 — ротор исправен, 1 — присутствует трещина) [10].

Архитектура нейросети

Модель нейронной сети реализована с помощью библиотеки **Keras**:

- входной слой: 5 нейронов (по числу признаков);
- скрытые слои: 2 скрытых слоя (32 и 16 нейронов) с ReLU-активацией;
- выходной слой: 1 нейрон с сигмоидной активацией (для бинарной классификации).

Результаты обучения

На рисунке приведен график изменения точности модели на обучающей и валидационной выборках в течение 50 эпох. Видно, что точность на обучении непрерывно растет и достигает значения $\approx 98\%$. В то же время валидационная точность стабилизируется около значения 94% , начиная примерно с 20-й эпохи, что может свидетельствовать о начале переобучения. Это позволяет сделать вывод о высокой эффективности модели при условии правильной остановки обучения: Kod Python (рис. 1).

Анализ графика обучения модели (рис. 2)

– Ось X (горизонтальная): количество эпох обучения (всего 50).

– Ось Y (вертикальная): значение точности (accuracy) от 0 до 1.

Синяя линия — точность на обучающей выборке:

Модель начинает с $\approx 0,63$ и быстро обучается, достигая $0,98+$ к 35-й эпохе. Это означает, что модель хорошо запомнила закономерности в обу-

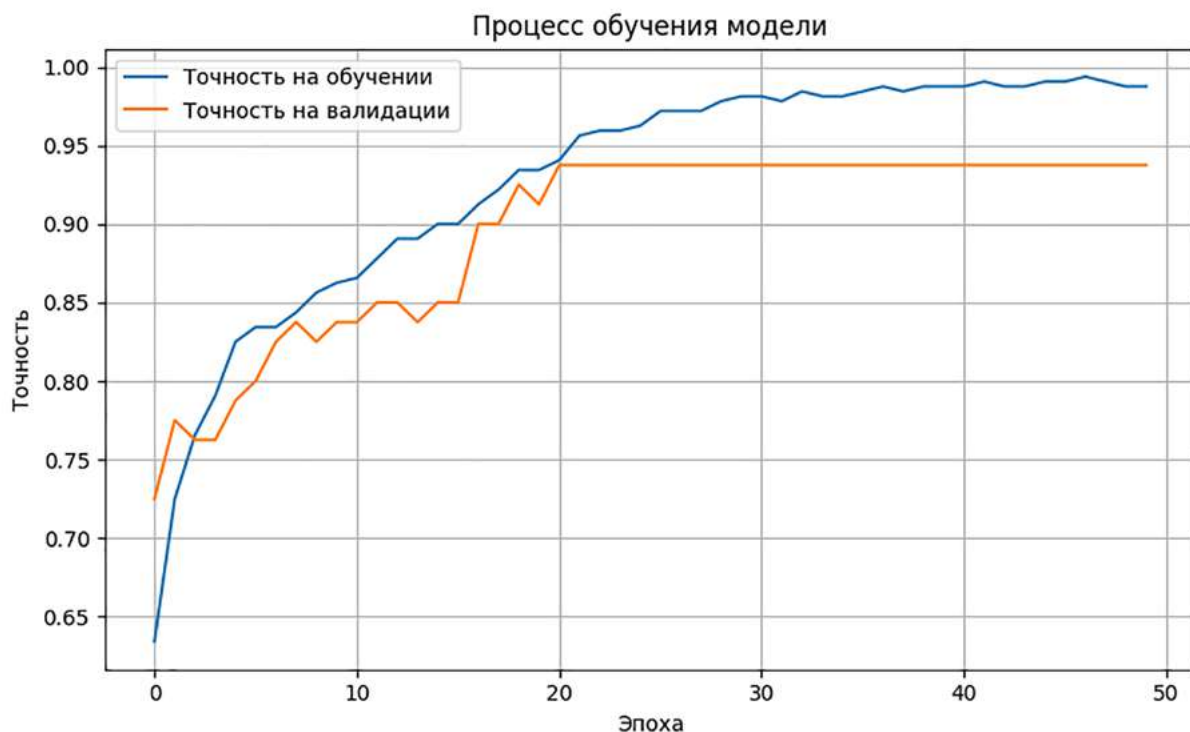


Рис. 2. График изменения точности модели на обучающей и валидационной выборках в течение 50 эпох

чающих данных. Оранжевая линия — точность на валидационной выборке:

- Начинается с $\approx 0,73$, затем плавно растет до $\approx 0,94$ к 20-й эпохе.

- Начиная с 20-й эпохи валидационная точность стабилизируется.

- Это указывает на возможное перенапряжение (overfitting) после 20-й эпохи — модель уже «переучилась» на обучающих данных.

Качество обучения высокое — точность как на обучении, так и на валидации выше 90 %. Рекомендуется использовать EarlyStopping — остановку обучения на 20-й эпохе, чтобы избежать переобучения. Модель демонстрирует устойчивость и высокую обобщающую способность, так как валидация идет почти в ногу с обучением до стабилизации [11].

Список источников

1. Баннов Д. М. Метод диагностики обрывов стержней ротора в асинхронных электродвигателях на основе

регрессионного анализа / Д. М. Баннов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 5. — С. 196–208.

2. Гуденов В. П. Неисправности асинхронных электрических двигателей / В. П. Гуденов // Вестник науки. — 2020. — № 8(29). — Т. 2.

3. Хамидов О. Р. Научные основы совершенствования методов диагностирования асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов на железных дорогах Республики Узбекистан: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / О. Р. Хамидов.

4. Бугеря Т. И. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора / Т. И. Бугеря // Электричество. — 2012. — № 7. — С. 51–57.

5. Вейнреб К. Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: дис. ... магистра / К. Б. Вейнреб.

6. Деркачев С. В. Математическое моделирование повреждений асинхронного электродвигателя / С. В. Деркачев, В. А. Сидоров // Надежность и безопас-

ность энергетики. — 2025. — Т. 18. — № 1. — С. 59–64. — DOI: 10.24223/1999-5555-2025-18-1-59-64.

7. Васьковский Ю. Н. Диагностика комбинированных дефектов ротора асинхронного двигателя индукционным методом / Ю. Н. Васьковский, М. А. Коваленко // *ЕиЕ*. — 2013. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-kombinirovannyh-defektov-rotora-asinhronnogo-dvigatelya-induktsionnym-metodom>.

8. Васильева Ю. З. Диагностика повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя / Ю. З. Васильева, В. И. Полищук // *Технические науки в России и за рубежом: материалы IV Междунар. науч. конф.* (Москва, январь 2015 г.). — М.: Буки-Веди, 2015. — С. 50–53. — URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/124/6888>.

9. Сафин Н. Р. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н. Р. Сафин, В. А. Прахт и др. // *Russian Electrical Engineering*. — 2016. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-neispravnostey-asinhronnyh-dvigatelyey-na-osnove-spektralnogo-analiza-tokov-statora.pdf>.

10. Вейнреб К. Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01 / К. Б. Вейнреб.

11. Новожилов А. Н. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронного двигателя по среднеквадратичной величине дополнительных гармонических токов статора / А. Н. Новожилов, Е. В. Крюкова и др. // *Технические науки — от теории к практике*. — 2013. — № 27-1. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovanie-ekscentrisiteta-rotora-asinhronnogo-dvigatelya-po-srednekvadratichnoy-velichine-dopolnitelnyh-garmonicheskikh>.

Дата поступления: 27.08.2025

Решение о публикации: 08.10.2025

Контактная информация:

ВАХИДОВ Мираброр Хусан угли — аспирант кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; mirabrordvokhidov1995@gmail.com

ХАМИДОВ Отабек Рустамович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; otabek.rustamovich@yandex.ru

АКБАРОВА Шохсанам Шариповна — аспирант «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; akbarovashohsanam33@gmail.com

Artificial Neural Network for Rotor Fault Diagnosis in an Asynchronous Traction Motor Using Magnetic Induction Parameters

M. Kh. Vakhidov, O. R. Khamidov, Sh. Sh. Akbarova

Tashkent State Transport University, 1, Temiryulchilar Str., Mirabad District, Tashkent, Republic of Uzbekistan

For citation: Vakhidov M. Kh., Khamidov O. R., Akbarova Sh. Sh. Artificial Neural Network for Rotor Fault Diagnosis in an Asynchronous Traction Motor Using Magnetic Induction Parameters // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 916–925. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-916-925

Summary

Purpose: This paper presents a hybrid approach to the diagnosis of the rotor condition in an asynchronous traction motor. This approach is based on the analysis of magnetic induction parameters. Using experimental data obtained in CSV format, a model was constructed in Python environment employing an artificial neural network. **Methods:** In the initial phase, data preparation included numerical value standardisation and the elimination of extraneous noise. Subsequently, spectral analysis of magnetic induction signals was performed using the Fast Fourier Transform (FFT) to extract diagnostically significant frequency components. **Results:** The neural network architecture has been implemented using Keras and comprised two hidden layers. The model was trained on a dataset comprising 100 samples, and it has demonstrated high accuracy (up to 98%) on test data. A comparative analysis of magnetic field characteristics was carried out for defective and non-defective cases. The findings have demonstrated that the proposed approach is capable of effectively detecting rotor cracks while minimizing the necessity for complex measurement setups. **Practical significance:** The work has been carried out exclusively through the utilization of open-source tools.

Keywords: Asynchronous traction motor, magnetic induction, neural network, rotor fault diagnosis, spectral analysis, Python, machine learning, technical diagnostics, CSV, predictive maintenance.

References

1. Bannov D. M. Metod diagnostiki obryvov sterzhney rotora v asinkhronnykh elektrodvigatelyakh na osnove regressionnogo analiza [Method for diagnosing rotor bar breaks in asynchronous electric motors based on regression analysis]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2022, vol. 333, Iss. 5, pp. 196–208. (In Russian)
2. Gudenov V. P. Neispravnosti asinkhronnykh elektricheskikh dvigateley [Faults of asynchronous electric motors]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2020, Iss. 8(29), vol. 2. (In Russian)
3. Khamidov O. R. *Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya metodov diagnostirovaniya asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigateley lokomotivov na zheleznikh*

dorogakh Respubliki Uzbekistan: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.07 [Scientific foundations for improving diagnostic methods of asynchronous traction motors of locomotives on the railways of the Republic of Uzbekistan: Dr. Tech. Sci. diss.: 05.22.07]. (In Russian)

4. Bugerya T. I. Diagnostika neispravnostey rotora asinkhronnogo dvigatelya metodom spektral'nogo analiza tokov statora [Diagnosis of rotor faults in asynchronous motor using spectral analysis of stator currents]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2012, Iss. 7, pp. 51–57. (In Russian)

5. Veynreb K. B. *Diagnostika neispravnostey rotora asinkhronnogo dvigatelya metodom spektral'nogo analiza tokov statora: dis. ... magistra* [Diagnosis of rotor faults in asynchronous motor using spectral analysis of stator currents: Master's thesis]. (In Russian)

6. Derkachev S. V., Sidorov V. A. Matematicheskoe modelirovaniye povrezhdeniy asinkhronnogo elektrodvigatelya [Mathematical modeling of faults in asynchronous electric motor]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and Safety of Power Engineering]. 2025, vol. 18, Iss. 1, pp. 59–64. DOI: 10.24223/1999-5555-2025-18-1-59-64. (In Russian)
7. Vas'kovskiy Yu. N., Kovalenko M. A. *Diagnostika kombinirovannykh defektov rotora asinkhronnogo dvigatelya induktsionnym metodom* [Diagnosis of combined rotor defects in asynchronous motor by induction method]. *EiE*, 2013, Iss. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-kombinirovannyh-defektov-rotora-asinhronnogo-dvigatelya-induktsionnym-metodom>. (In Russian)
8. Vasil'eva Yu. Z., Polishchuk V. I. Diagnostika povrezhdeniya korotkozamknutoy obmotki rotora asinkhronnogo dvigatelya [Diagnosis of damage to the squirrel-cage winding of the rotor in an asynchronous motor]. *Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom: materialy IV Mezhdunar. nauch. konf. (Moskva, yanvar' 2015 g.)*. [Technical Sciences in Russia and Abroad: Proc. IV Int. Sci. Conf. (Moscow, January 2015)]. Moscow: Buki-Vedi Publ., 2015, pp. 50–53. Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/124/6888>. (In Russian)
9. Safin N. R., Prakht V. A. et al. *Diagnostika neispravnostey asinkhronnykh dvigateley na osnove spektral'nogo analiza tokov statora* [Diagnosis of faults in asynchronous motors based on spectral analysis of stator currents]. Russian Electrical Engineering, 2016. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-neispravnostey-asinhronnyh-dvigatelye-na-osnove-spektralnogo-analiza-tokov-statora.pdf>.
10. Veynreb K. B. *Diagnostika neispravnostey rotora asinkhronnogo dvigatelya metodom spektral'nogo analiza tokov statora: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.09.01* [Diagnosis of rotor faults in asynchronous motor using spectral analysis of stator currents: Extended abstract of Dr. Tech. Sci. diss.: 05.09.01]. (In Russian)
11. Novozhilov A. N., Kryukova E. V. et al. Diagnostirovaniye ekstsentriziteta rotora asinkhronnogo dvigatelya po srednekvadratichnoy velichine dopolnitel'nykh garmonicheskikh tokov statora [Diagnosis of rotor eccentricity in asynchronous motor by RMS value of additional harmonic stator currents]. *Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike* [Technical Sciences — from Theory to Practice]. 2013, Iss. 27-1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovaniye-ekstsentriziteta-rotora-asinhronnogo-dvigatelya-po-srednekvadratichnoy-velichine-dopolnitelnyh-garmonicheskikh>. (In Russian)

Received: August 27, 2025

Accepted: October 08, 2025

Author's information:

Mirabror Kh. VAKHIDOV — Postgraduate Student, “Locomotives and Locomotive Economy” Department; mirabrorvokhidov1995@gmail.com

Otabek R. KHAMIDOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the “Locomotives and Locomotive Economy” Department; otabek.rustamovich@yandex.ru

Shoxsanam Sh. AKBAROVA — Postgraduate Student, “Locomotives and Locomotive Economy” Department; akbarovashohsanam33@gmail.com

УДК 629.4.023

К вопросу о законе распределения динамической силы воздействия колеса на рельс

А. В. Романов, А. А. Киселев

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

Для цитирования: Романов А. В., Киселев А. А. К вопросу о законе распределения динамической силы воздействия колеса на рельс // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 926–937. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-926-937

Аннотация

Цель: Исследование направлено на определение закона распределения вертикальной динамической силы воздействия колеса на рельс для повышения точности расчетов надежности железнодорожного пути. **Методы:** Использован метод кусочно-непрерывной регистрации сил (метод ПГУПС) с анализом данных 9400 колесных пар. Применены статистические методы (критерии Шапиро — Уилка, Колмогорова — Смирнова, AIC) для оценки соответствия экспериментальных данных нормальному и альтернативным распределениям (логнормальному, гамма, Вейбулла). **Результаты:** Установлено, что нормальное распределение не описывает «тяжелые хвосты» экспериментальных данных. Наилучшее соответствие показало гамма-распределение. Для сложных случаев предложены смешанные распределения (например, нормальное + гамма), улучшающие точность моделирования. **Практическая значимость:** Результаты позволяют усовершенствовать методики расчета пути по предельным состояниям, учитывая реальное распределение динамических нагрузок.

Ключевые слова: Вертикальная динамическая сила, распределение сил, железнодорожный путь, гамма-распределение, смешанные распределения, ударное воздействие, статистический анализ, методы измерений.

Введение

Снижение деформативности балластного слоя и грунтов земляного полотна является наиболее актуальной задачей путевого хозяйства железных дорог Российской Федерации. В актуализированной редакции СП 119.13330.2024 «Железные дороги колеи 1520 мм» особое внимание уделяется обеспечению требуемой деформативности грунтов земляного полотна. Так, нормами предусматривается устройство подбалластных защитных слоев для всех категорий железнодорожных линий с целью достижения на поверхности основной площадки земляного полотна требуемого штампового модуля деформации E_{v2} .

В соответствии с утверждениями ученых в области взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава, в том числе А. Я. Когана [1], задачи расчетов железнодорожного пути по первому предельному состоянию могут решаться в детерминистической постановке. Для оценки накопления остаточных деформаций по второму предельному состоянию расчеты должны выполняться только в вероятностной постановке. Деформативные характеристики грунтов снижаются под действием как вибрации, так и повышенного динамического воздействия на грунты, определение которых и выполняется по теории вероятности.

В Правилах расчетов пути на прочность, основные положения которых разработаны в 1954 г. [2], принято, что все многообразие действующих на железнодорожный путь переменных силовых факторов при движении по нему подвижного состава описывается нормальным законом распределения случайной величины (кривой Гаусса). В соответствии с Правилами вертикальная динамическая сила складывается из следующих составляющих:

- статической нагрузки от колеса на рельс;
- сил инерции, возникающих из-за колебаний кузова на рессорах;
- сил инерции, возникающих из-за наличия на колесах подвижного состава непрерывных и изолированных неровностей;
- сил инерции, возникающих при преодолении колесом неровностей на пути.

Плотность вероятности нормального распределения определяется по известной формуле:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ — стандартное отклонение случайной величины, в рассматриваемом случае — вертикальной динамической силы, кН;

μ — среднее значение вертикальной динамической силы, кН.

Возможность использования закона Гаусса обеспечивается наличием практически независимых случайных величин, особенно если среди них нет одной или двух доминирующих величин, которые не подчиняются закону Гаусса [3]. Так, например, колебания кузова на рессорах, колебания центра масс колеса, имеющего непрерывную неровность, колебания центра масс колеса, движущегося по неровности на пути длиной больше длины окружности колеса, имеют гармонический характер. Доминирующими величинами при определении распределения вертикальной силы являются силы, которые возникают из-за корот-

ких изолированных неровностей на колесе и на рельсе. Такие силы имеют высокочастотное ударное воздействие.

Определение ударной силы

Точное определение ударной силы воздействия колес на рельсы во время разработки первых правил расчетов железнодорожного пути было весьма затруднительно. Первые экспериментальные измерения вертикальных динамических сил выполнялись методом Шлюмпфа [4], который заключается в определении разности моментов в двух точках поперечного сечения рельса. Величину ударной силы при наличии изолированных неровностей на колесе в данном методе измерить практически невозможно, так как измерительная зона расположена в одной точке, и вероятность того, что удар ползуна произойдет именно в месте измерительной зоны, мала.

В работе Н. Н. Кудрявцева [5] была исследована сила удара, действующая на шейку рельса, на путях различных конструкций. Была получена зависимость силы удара от скорости движения.

До февраля 2023 г. действовал ГОСТ Р 55050 «Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний», область применения которого распространялась на выявление дефектов на поверхности катания колес. Максимальное значение вертикальной силы установлено 450 кН, при регистрации которой вагон подлежал бы обязательной отцепке. Как уже было отмечено ранее, данный метод регистрировал воздействие от подвижного состава в одиночном сечении пути, и в случае, если ударное воздействие не реализовывалось непосредственно над оборудованным сечением пути, оно не регистрировалось.

С целью исключения данного недостатка кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО ПГУПС был предложен метод двух сечений (метод ПГУПС) [6–11], который предполагает

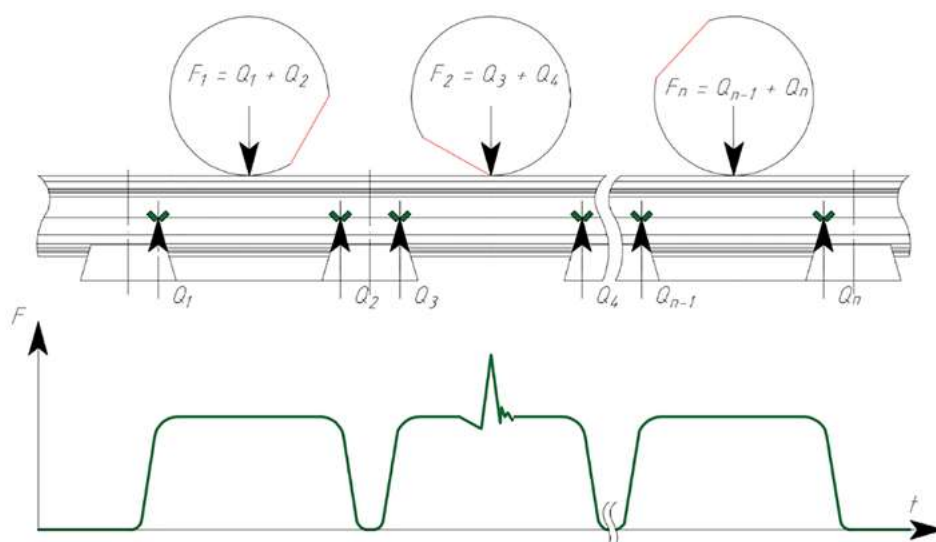


Рис. 1. Схема измерительного участка пути с реализацией метода кусочно-непрерывной регистрации вертикальных сил по измерению касательных напряжений в двух сечениях рельса:

a — схема расположения датчиков; *б* — записи возникающих сил;

F_1-F_4 — восстанавливаемые вертикальные усилия; Q_1-Q_4 — поперечные усилия на рельсе

кусочно-непрерывную регистрацию вертикальных сил на протяжении измерительного участка длиной примерно 200 мм, как показано на рис. 1.

В 2023 г. специалистами ПГУПС была выполнена серия экспериментов по определению повышенного вертикального динамического воздействия с использованием метода двух сечений на подходах к порту Усть-Луга, где обращаются поезда повышенной массы и длины. Под повышенным динамическим воздействием будем понимать вертикальное воздействие колес, имеющих неровности на поверхности катания, которое явно отличается от среднего значения вертикаль-

ной силы. Было оборудовано 15 измерительных сечений на длине 10 м. Всего в период измерений было проанализировано состояние 9400 колесных пар.

По результатам измерений были выборочно проверены колеса поезда, прошедшего измерительные сечения. Это позволило построить график зависимости ударной силы колеса по рельсу, имеющего ползун глубиной 1 мм, от скорости движения. Анализ зависимости, представленной на рис. 2, показывает, что форма зависимости близка к полученной Н. Н. Кудрявцевым [5], однако значения ударной силы значительно выше.

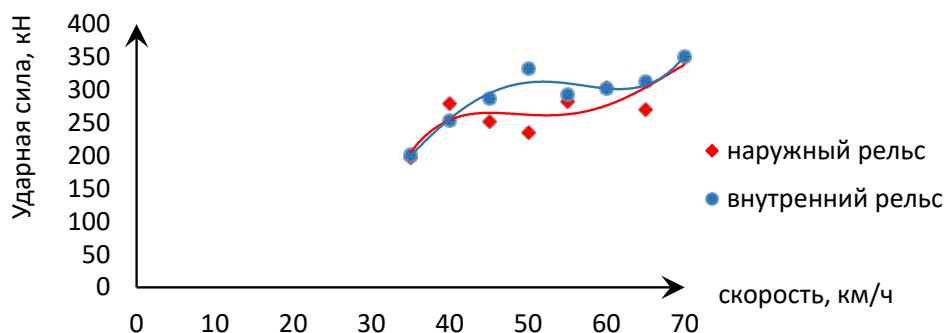


Рис. 2. Зависимость ударной силы колеса по рельсу от скорости движения

Определение закона распределения случайной величины — вертикальной динамической силы воздействия от колеса на рельс

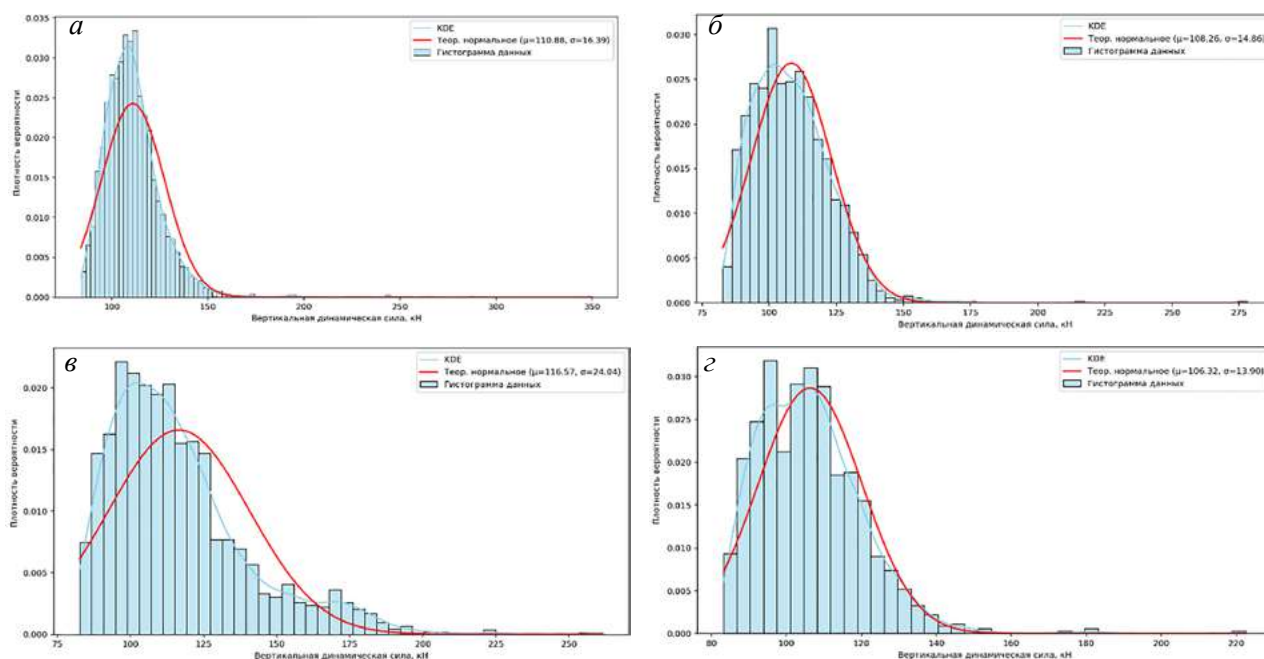
Для оценки повышенного динамического воздействия были проанализированы вертикальные динамические силы воздействия от всех осей в 33 поездах по наружной и внутренней нити (всего 66 случаев). Результаты были ранжированы для каждого поезда отдельно и отдельно по наружной и внутренней нити (то есть всего 66 выборок). На рис. 3 представлена аппроксимация некоторых экспериментальных измерений вертикальных сил нормальным законом распределения.

Для оценки нормальности распределения использованы методы Шапиро — Уилка и Колмогорова — Смирнова. Напомним, что такая оценка ведется по величине уровня значимости p -value. В случае если p -value $\geq 0,05$, то нет оснований

отвергать принятую гипотезу о законе распределения на уровне значимости 5 %. Если же p -value $< 0,05$, то гипотеза отвергается.

Результаты проверки данных экспериментальных измерений показывают, что для всех поездов тест Шапиро — Уилка отвергает гипотезу о нормальности распределения (p -value близко к нулю), а тест Колмогорова — Смирнова только в двух случаях не отвергает принятую гипотезу (значения p -value составили 0,065 и 0,078).

Для визуальной оценки нормальности распределения используют график «квантиль-квантиль». Такие графики представлены на рис. 4, где синими точками изображены квантили экспериментальных данных, красной линией — квантили нормального распределения. Анализ показывает, что имеются значительные расхождения экспериментальных данных от нормального распределения в начале и в конце графиков.



Условные обозначения: KDE — ядерная оценка плотности вероятности; μ — среднее значение вертикальной силы, кН; σ — среднее квадратическое отклонение, кН

Рис. 3. Гистограмма распределения вертикальных сил от колес одного поезда и аппроксимация нормальным законом распределения:
а — скорость 69 км/ч; б — скорость 55 км/ч; в — скорость 62 км/ч; г — скорость 57 км/ч.

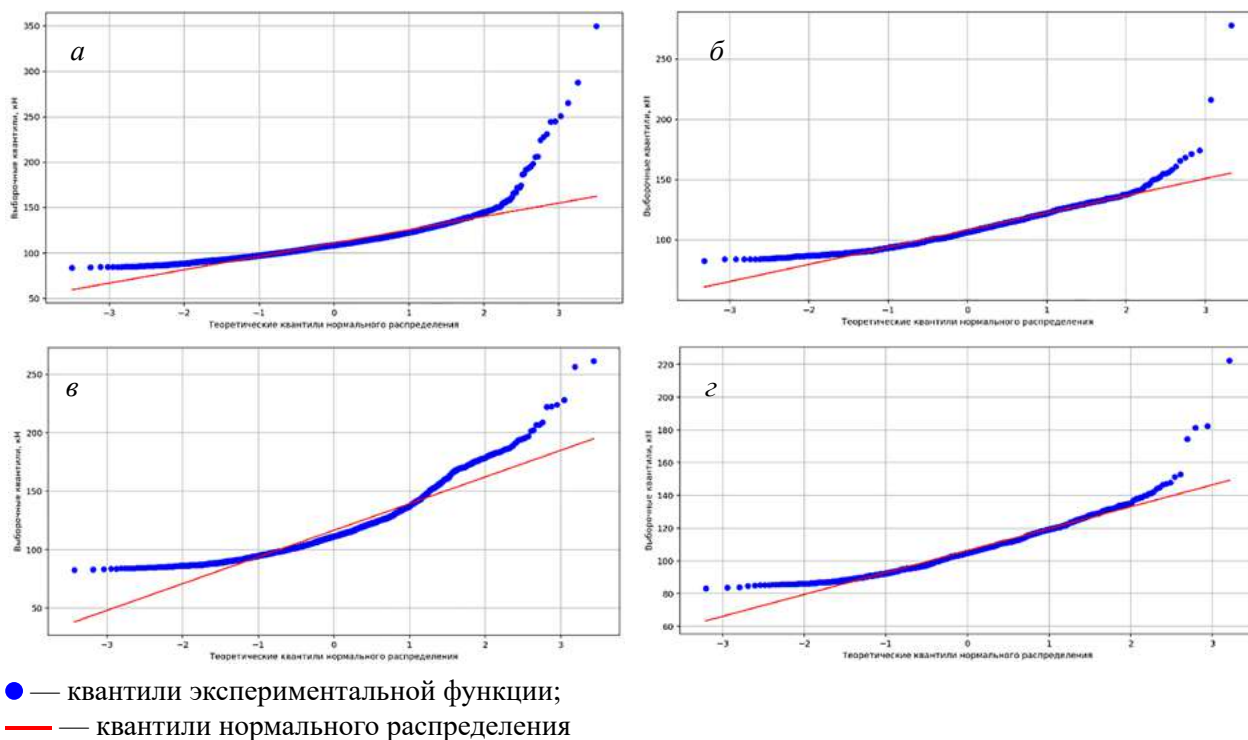


Рис. 4. График «квантиль-квантиль» для экспериментальной функции и нормального распределения:

а — скорость 69 км/ч; *б* — скорость 55 км/ч; *в* — скорость 62 км/ч; *з* — скорость 57 км/ч

Таким образом, можно сделать вывод о том, что закон распределения вертикальных сил не может быть отнесен к нормальному. Все распределения имеют «тяжелые хвосты» с коэффициентом асимметрии от 0,25 до 4,08. Из 66 проанализированных выборок только 9 имеют вершину, близкую к нормальному распределению (коэффициент эксцесса от -0,5 до +0,5). Все остальные случаи имеют острую вершину с коэффициентом эксцесса больше +1.

Выбор наилучшего закона распределения случайной величины — вертикальной динамической силы воздействия от колеса на рельс

Так как ранее был сделан вывод о том, что закон распределения случайной величины не может быть принят нормальным, то необходимо подобрать такое распределение, которое наилучшим образом будет описывать полученные экспериментальные данные вертикальных сил от

колес, в составе которых имеются случаи повышенного динамического воздействия. Нами проанализированы следующие гипотезы о законе распределения случайных величин:

— логнормальное распределение, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2};$$

— гамма-распределение, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{\alpha^\beta x^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} e^{-\alpha x};$$

где α — коэффициент формы;

β — коэффициент масштаба;

$\Gamma(\beta)$ — гамма-функция Эйлера, которая имеет вид:

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{+\infty} x^{\beta-1} e^{-x} dx;$$

– распределение χ -квадрат, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{k}{2}}}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} x^{\frac{k}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}},$$

где k — число степеней свободы или число независимых стандартных нормальных случайных величин;

– распределение Вейбулла, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}};$$

– распределение Релея, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}};$$

– логистическое распределение, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{x-\mu}{s}}}{s \left(1 + e^{-\frac{x-\mu}{s}}\right)^2};$$

где s — коэффициент эксцесса;

– распределение Стюдента, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sqrt{n\pi}\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}};$$

– распределение Коши, плотность вероятности которого рассчитывается по формуле:

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\beta}{\beta^2 + (x - \alpha)^2} \right).$$

Для выбора наилучшего распределения из 66 выборок использовался информационный критерий AIC [12]. Данный метод позволяет выбрать закон распределения, который имеет наибольшую точность и наименьшую сложность. В результате были выбраны 4 наилучших закона распределения:

– логнормальное распределение (рис. 5, а), которое имеет вероятность быть лучшим распределением 22,42 %;

– распределение χ -квадрат (рис. 5, б), которое имеет вероятность быть лучшим распределением 22,86 %;

– γ -распределение (рис. 5, в), которое имеет вероятность быть лучшим распределением 23,78 %;

– распределение Вейбулла (рис. 5, г), которое имеет вероятность быть лучшим распределением 18,07 %;

Для наглядной оценки соответствия данных измерений вертикальной динамической силы теоретическому распределению были построены графики «квантиль-квантиль». Анализ рис. 6 показывает достаточно хорошую сходимость. Имеется небольшой разброс значений в правом «хвосте».

Для оценки соответствия экспериментальных данных подобранному распределению возможно пользоваться методом Колмогорова — Смирнова и критерием χ -квадрат. По результатам теста Колмогорова — Смирнова из 66 исследованных выборок в 39 случаях (59 %) не было обнаружено статистически значимых оснований для отклонения гипотезы о соответствии данных предполагаемому закону распределения при уровне значимости 5 %. По тесту χ -квадрат только в 12 выборках (18 %) отсутствуют основания отвергать принятый закон распределения на уровне значимости 5 %. Из сказанного выше можно сделать вывод, что экспериментальные данные имеют большую неравномерность распределения.

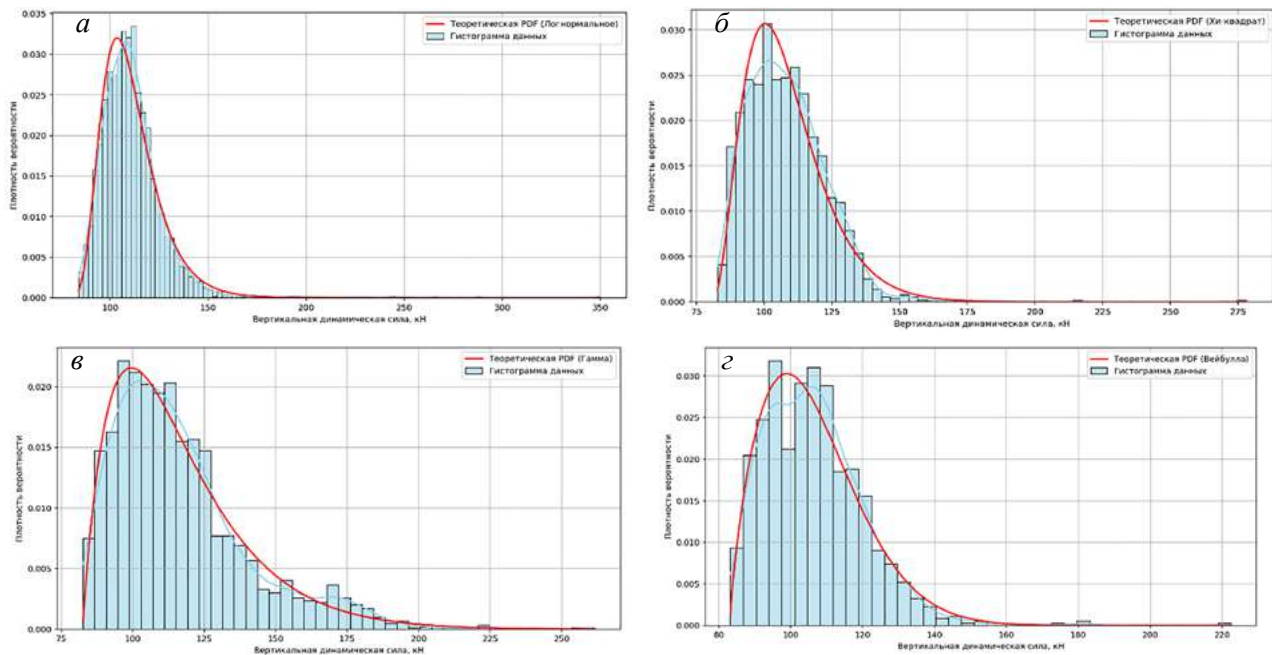


Рис. 5. Гистограмма распределения вертикальных сил от колес одного поезда и аппроксимация:

а — логнормальным распределением; *б* — распределением χ -квадрат;
в — γ -распределением; *г* — распределением Вейбулла

Смешанные распределения для вертикальной динамической силы

Для оценки сложных распределений в статистике используют смешанные распределения. Они представляют собой сумму различных законов распределения:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x),$$

где ω_i — вес i -го распределения;

$f_i(x)$ — плотность вероятности i -го распределения.

Был выполнен подбор различных смесей распределения: нормальное + нормальное, нормальное + γ -распределение, γ -распределение + γ -распределение, нормальное + нормальное + γ -распределение, нормальное + нормальное + γ -распределение, нормальное + γ -распределение + γ -распределение, γ -распределение + γ -распределение. Для определения весов распределений использовался

метод логарифмического правдоподобия [13]. На рис. 7 представлены результаты подбора наилучших смесей распределений.

На рис. 7, *а*, *г* представлена смесь распределений нормальное + γ -распределение + γ -распределение:

$$F(x) = \omega_1 N_1(x|\mu_1, \sigma_1) + \omega_2 \Gamma_2(x|\alpha_2, \beta_2) + \omega_3 \Gamma_3(x|\alpha_3, \beta_3),$$

где N_1 — функция плотности вероятности нормального распределения;

μ_1 — математическое ожидание вертикальной динамической силы, кН;

σ_1 — стандартное отклонение вертикальной динамической силы, кН;

$\Gamma(x)$ — функция плотности вероятности γ -распределения;

α_i — коэффициент формы γ -распределения;

β_i — коэффициент масштаба γ -распределения.

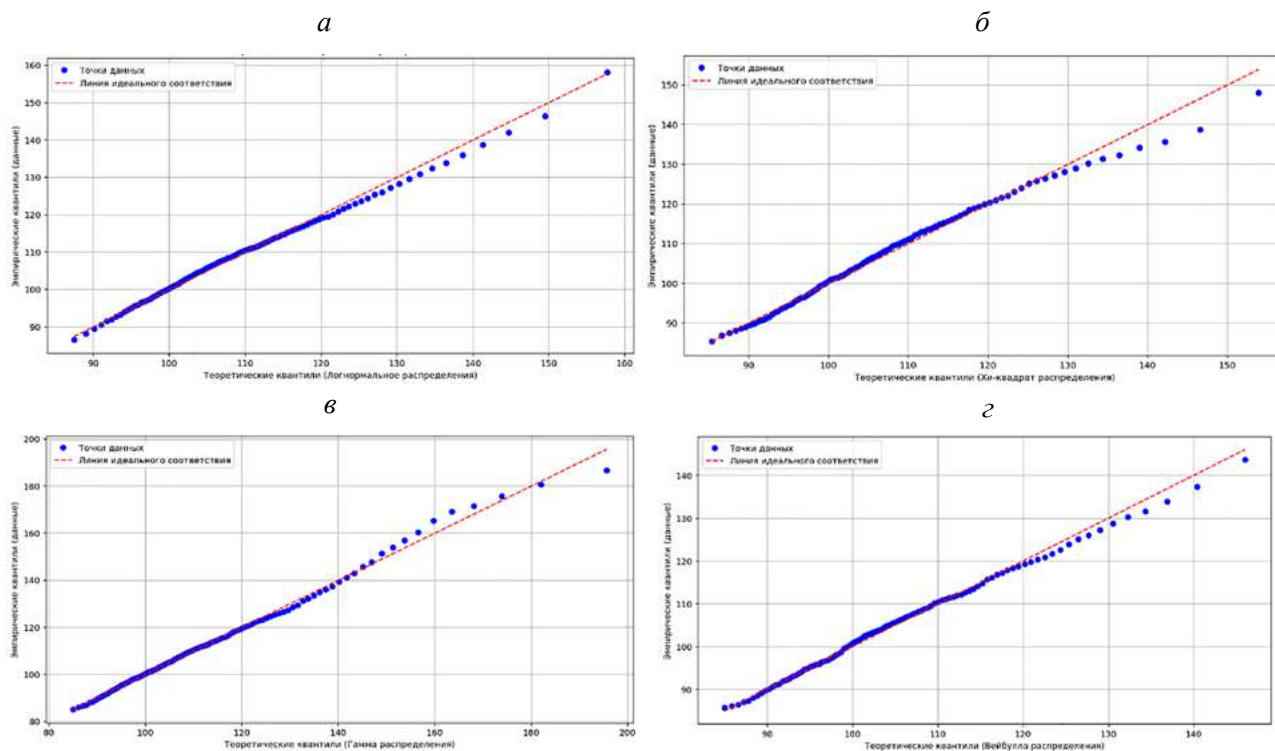


Рис. 6. График «квантиль-квантиль» для экспериментальной функции и распределения:

a — логнормального распределения; *б* — распределения χ -квадрат;

в — γ -распределения; *г* — распределения Вейбулла

На рис. 5, *б* представлена смесь распределений γ -распределение + γ -распределение + γ -распределение:

$$F(x) = \omega_1 \Gamma_1(x|\alpha_1, \beta_1) + \omega_2 \Gamma_2(x|\alpha_2, \beta_2) + \omega_3 \Gamma_3(x|\alpha_3, \beta_3).$$

На рис. 5, *в* представлена смесь распределений нормальное + нормальное + γ -распределение:

$$F(x) = \omega_1 N_1(x|\mu_1, \sigma_1) + \omega_2 N_2(x|\mu_2, \sigma_2) + \omega_3 \Gamma_3(x|\alpha_3, \beta_3).$$

Параметры подобранных смесей распределений сведены в табл. 1.

Заключение

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

Закон распределения случайной величины — вертикальной динамической силы воздействия от колеса на рельс — далеко не всегда можно отнести к нормальному, принятому в Правилах расчета пути на прочность. Это допущение в Правилах, по всей видимости, было принято ввиду технической сложности достоверного обнаружения сверхнормативного ударного воздействия колеса на рельс. Современные методы измерений позволяют с достаточно большой точностью выявлять и измерять такое воздействие. Выполненные расчеты показывают, что распределение вертикальной динамической силы имеет асимметрию (тяжелые правые «хвосты»).

Наилучшее соответствие экспериментальным измерениям вертикальных сил от колеса на рельс имеет гамма-распределение. Этот закон распределения достаточно хорошо отображает результаты эксперимента. Однако ввиду большой

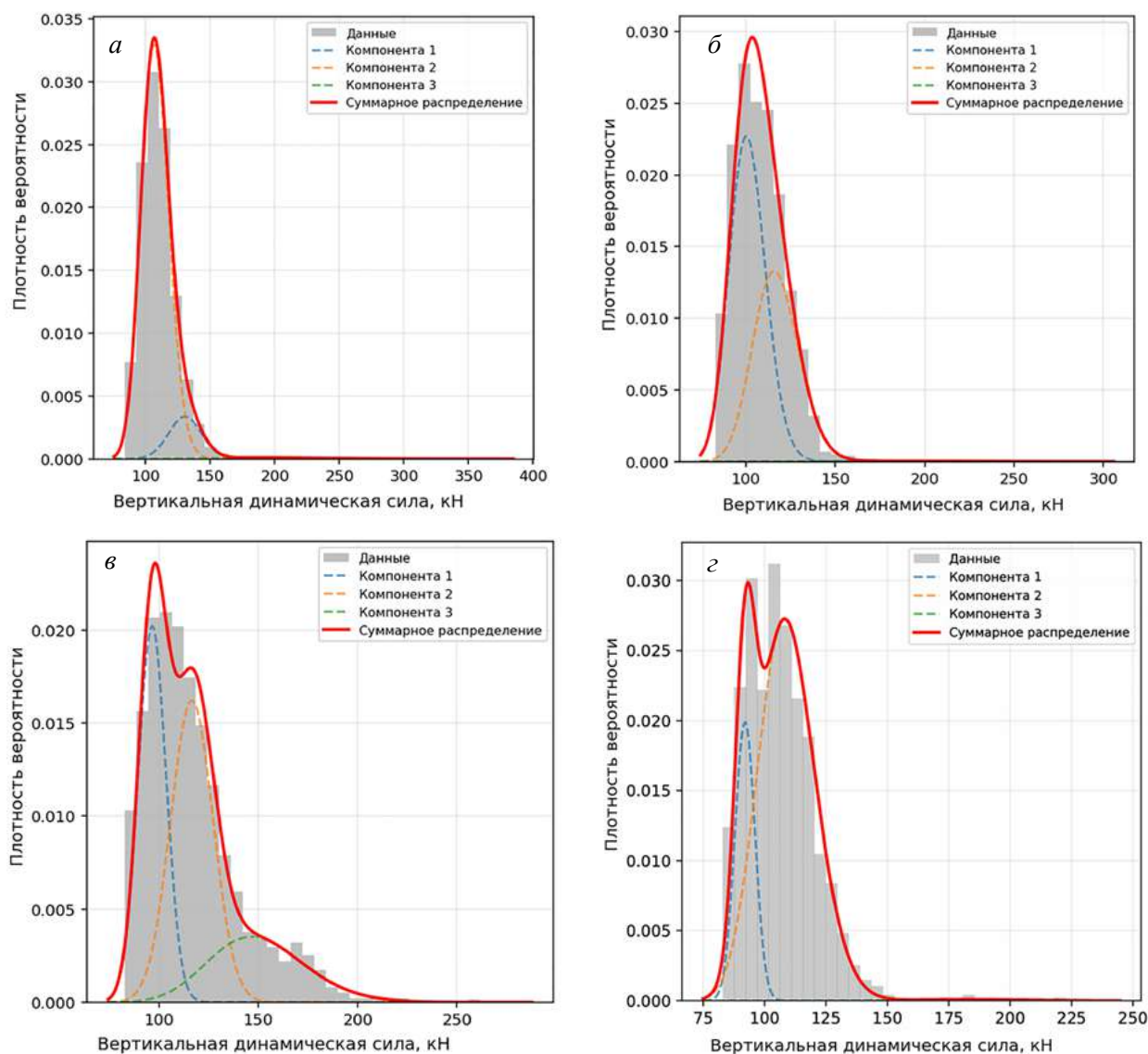


Рис. 7. Гистограмма распределения вертикальных сил от колес одного поезда и аппроксимация смесью:

- а — нормальное + γ -распределение + γ -распределение;
- б — γ -распределение + γ -распределение + γ -распределение;
- в — нормальное + нормальное + γ -распределение;
- г — нормальное + γ -распределение + γ -распределение

неравномерности измеренных данных имеются расхождения в правом «хвосте».

Для более точной оценки вертикальной динамической силы рекомендуется использовать смеси распределений, которые хорошо отражают результаты измерений, в том числе в правом «хвосте». При современном развитии вычислительных средств эти законы распределения не представляют технических сложностей.

Таким образом, для практических расчетов железнодорожного пути по первому предельному состоянию необходимо пересмотреть методику определения вертикальных сил от колеса на рельс с учетом изменения закона распределения случайной величины и использовать гамма-распределение.

Для более сложных моделей расчетов железнодорожного пути по второму предельному

Таблица 1. Параметры подобранных смесей распределения

Смесь распределения	Веса компонентов распределения	Среднее значение экспериментальных данных, кН	Стандартное отклонение экспериментальных данных, кН	Среднее значение смеси распределения, кН	Стандартное отклонение смеси распределения, кН	p-value по методу Колмогорова — Смирнова
рис. 5, а $N_1(x) + \Gamma_2(x) + \Gamma_3(x)$	$\omega_1 = 0,1061$, $\omega_2 = 0,8841$, $\omega_3 = 0,0098$	110,88	16,40	111,10 +0,20 %	16,79 +2,40 %	0,486
рис. 5, б $\Gamma_1(x) + \Gamma_2(x) + \Gamma_3(x)$	$\omega_1 = 0,5729$, $\omega_2 = 0,4235$, $\omega_3 = 0,1163$	108,26	14,86	107,76 -0,47 %	14,26 -4,08 %	0,134
рис. 5, в $N_1(x) + N_2(x) + \Gamma_3(x)$	$\omega_1 = 0,3561$, $\omega_2 = 0,4338$, $\omega_3 = 0,2102$	116,57	24,04	117,03 +0,39 %	23,92 -0,50 %	0,309
рис. 5, г $N_1(x) + \Gamma_2(x) + \Gamma_3(x)$	$\omega_1 = 0,2019$, $\omega_2 = 0,7934$, $\omega_3 = 0,0047$	106,32	13,90	106,13 -0,17 %	13,72 -3,78 %	0,197

состоянию предлагается определять вертикальную динамическую силу, основываясь на смешанном распределении.

Список источников

1. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган; под ред. М. Ф. Вериго. — М.: Транспорт, 1986. — 559 с.

2. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706/р.

3. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1969. — 536 с.

4. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmesstreifen bei den SBB / G. Schlumpf // Technische Rundschau. — Bern, 1955. — Iss. 26. — Pp. 35–41.

5. Кудрявцев Н. Н. Исследование динамики необрессоренных масс вагонов / Н. Н. Кудрявцев // Труды ЦНИИ МПС. — М.: Транспорт, 1965. — Вып. 287.

6. Рахимов Р. В. Нагруженность ходовых частей вагонов и пути и обоснование возможности увеличения осевых нагрузок на железных дорогах Республики Узбекистан: дисс. ... д-ра техн. наук / Р. В. Рахимов. — СПб., 2020. — 366 с.

7. Бороненко Ю. П. Кусочно-непрерывное измерение сил между колесом и рельсом по касательным напряжениям в двух сечениях рельса / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, А. А. Петров // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 3(76). — С. 58–64.

8. Бороненко Ю. П. Непрерывное измерение вертикальных нагрузок в контакте между колесом и рельсом по напряжениям в двух сечениях рельса / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса, Санкт-Петербург, 12–30 ноября 2018 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018. — С. 37–38.

9. Бороненко Ю. П. Апробация нового метода измерения вертикальной нагрузки от колеса на рельс / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, Д. А. Сергеев и др. // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 1(80). — С. 56–59.

10. Бороненко Ю. П. Измерение боковых нагрузок от колес на рельсы / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 4(83). — С. 45–50. — EDN DGEAEF.

11. Бороненко Ю. П. Экспериментальное определение боковых нагрузок от взаимодействия колеса

с рельсом / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 6(85). — С. 50–53.

12. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification / H. Akaike // IEEE Transactions on Automatic Control. — 1974. — Vol. AC-19. — Pp. 716–723.

13. Casella G. Statistical inference / G. Casella, R. L. Berger. — 2nd ed.

Дата поступления: 07.09.2025

Решение о публикации: 05.10.2025

Контактная информация:

РОМАНОВ Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, доц.; andrey.romanov@mail.ru

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доц.; zhdp10@gmail.com

On the Distribution Law of Dynamic Wheel–Rail Interaction Force

A. V. Romanov, A. A. Kiselev

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

For citation: Romanov A. V., Kiselev A. A. On the Distribution Law of Dynamic Wheel-Rail Interaction Force // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 926–937. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-926-937

Summary

Purpose: To establish the law of distribution of the vertical dynamic wheel-rail force. This will improve the accuracy and reliability of railway track calculations. **Methods:** A piecewise-continuous force measurement method known as the SPTU (PGUPS) technique was used to analyze data collected from 9,400 wheelsets. The application of statistical tests, including Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, and AIC, was employed to evaluate the compatibility of experimental data with normal and alternative distributions (lognormal, gamma, and Weibull). **Results:** The normal distribution has been found to be inadequate in describing the “heavy tails” observed in the experimental data. The gamma distribution has been found to provide the optimal fit. In cases of a complex nature, the proposal of mixed distributions (e.g. normal + gamma) has been put forward, with the aim of enhancing the accuracy of the modelling. **Practical significance:** The findings facilitate the refinement of track design methodologies for limit states, accounting for real dynamic load distributions.

Keywords: Vertical dynamic force, force distribution, railway track, gamma distribution, mixed distribution models, impact forces, statistical analysis, measurement methods.

References

1. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of track and rolling stock]. M.: Transport Publ., 1986, 559 p. (In Russian)
2. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti: utverzhdena rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 22.12.2017 № 2706/r* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the

track in terms of reliability assurance: approved by Order of JSC “RZD” № 2706/r dated 22.12.2017]. (In Russian)

3. Shakhunyants G. M. *Zheleznodorozhnyy put'. Izd. 2-e, pererab. i dop.* [Railway track, 2nd ed., rev. and enl.]. Moscow: Transport Publ., 1969, 536 p. (In Russian)

4. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmesstreifen bei den SBB. *Technische Rundschau*, Bern, 1955, Iss. 26, pp. 35–41.

5. Kudryavtsev N. N. Issledovanie dinamiki neobres-sorenykh mass vagonov [Research on the dynamics of unsprung wagon masses]. *Trudy TsNII MPS* [Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways]. 1965, Iss. 287. (In Russian)
6. Rakhimov R. V. *Nagruzhenost' khodovykh chastey vagonov i puti i obosnovanie vozmozhnosti uvelicheniya oseykh nagruzok na zheleznnykh dorogakh Respubliki Uzbekistan: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Loading of wagon running parts and track and justification of the possibility of increasing axle loads on railways of the Republic of Uzbekistan: Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2020, 366 p. (In Russian)
7. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Petrov A. A. Kusochno-nepreryvnoe izmerenie sil mezhdu kolesom i rel'som po kasatel'nykh napryazheniyam v dvukh secheniyakh rel'sa [Piecewise-continuous measurement of forces between wheel and rail by tangential stresses in two rail sections]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2018, Iss. 3(76), pp. 58–64. (In Russian)
8. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. Nepreryvnoe izmerenie vertikal'nykh nagruzok v kontakte mezhdu kolesom i rel'som po napryazheniyam v dvukh secheniyakh rel'sa [Continuous measurement of vertical loads in contact between wheel and rail by stresses in two rail sections]. *Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke: sbornik trudov XII Sankt-Peterburgskogo kongressa, Sankt-Peterburg, 12–30 noyabrya 2018 goda* [Professional Education, Science, and Innovations in the 21st Century: Proceedings of the XII St. Petersburg Congress, St. Petersburg, November 12–30, 2018]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobsh-cheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2018, pp. 37–38. (In Russian)
9. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Sergeev D. A. et al. Aprobatsiya novogo metoda izmereniya vertikal'noy nagruzki ot kolesa na rel's [Approval of a new method for measuring vertical load from wheel to rail]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 1(80), pp. 56–59. (In Russian)
10. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. Izmerenie bokovykh nagruzok ot koles na rel'sy [Measurement of lateral loads from wheels to rails]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 4(83), pp. 45–50. (In Russian)
11. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. Eksperimental'noe opredelenie bokovykh nagruzok ot vzaimodeystviya kolesa s rel'som [Experimental determination of lateral loads from wheel-rail interaction]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 6(85), pp. 50–53. (In Russian)
12. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. AC-19, pp. 716–723.
13. Casella G., Berger R. L. *Statistical inference*. 2nd ed.

Received: September 07, 2025

Accepted: October 05, 2025

Author's information:

Andrey V. ROMANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; andrey.romanov@mail.ru

Artem A. KISELEV — PhD in Engineering, Associate Professor; zhdp10@gmail.com

УДК 656.2 + 621.59:51-72

Определение температурных полей различных грузов при перевозке в автономных рефрижераторных контейнерах с использованием холода сжиженного природного газа

И. Г. Киселев, В. В. Галов, М. Ю. Кудрин, Д. Я. Монастырский

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

Для цитирования: Киселев И. Г., Галов В. В., Кудрин М. Ю., Монастырский Д. Я. Определение температурных полей различных грузов при перевозке в автономных рефрижераторных контейнерах с использованием холода сжиженного природного газа // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 938–946. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-938-946

Аннотация

Цель: Разработать методику оценки теплового состояния грузов при помощи определения температурных полей различных грузов с регламентированным температурным режимом при их перевозке в автономных рефрижераторных контейнерах с использованием сжиженного природного газа (СПГ) и экспериментальное подтверждение модели. Определить способ расчета массового расхода СПГ, необходимого для поддержания температурного равновесия в контейнере. **Методы:** Определение температурного состояния рассматриваемых грузов сведено к решению задачи теплопроводности в двумерной расчетной области с граничными условиями третьего рода и получению соответствующих температурных полей. Способ расчета расхода СПГ для поддержания температурного равновесия разработан на основе метода теплового баланса. **Результаты:** Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель, описывающая теплообмен различных грузов при транспортировке в автономном рефрижераторном контейнере с использованием холода СПГ. Сформулирована методика для расчета расхода СПГ для компенсации избыточных теплопритоков, проведен расчет, и получены температурные поля для сценария с перевозкой плодоовощей. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации условий транспортировки грузов при помощи хладотранспорта и разработки новых систем охлаждения рефрижераторных контейнеров с использованием СПГ в качестве дополнительного источника холода.

Ключевые слова: Автономные рефрижераторные контейнеры, охлаждение, рефрижераторные перевозки, сжиженный природный газ, температурные поля.

Введение

Из-за расширения географии контейнерных перевозок, усложнения логистики и маршрутов перевозок применение систем рефрижераторных систем необходимо для транспортировки все большего числа грузов. В 2024 г. объем перевозок контейнеров по сети РЖД составил 7,9 млн ДФЭ (двадцатифутовый эквивалент), что на 6 % выше показателя 2023 г. и на 36 % выше показателя 2020-го [1]. По прогнозам экспертов Института

экономики и развития транспорта, к концу 2025 г. объемы могут достигнуть 8 млн ДФЭ [2]. При организации перевозок в рефрижераторных контейнерах для повышения сохранности и товарного вида продукции кроме ее охлаждения важно длительное время поддерживать стабильность температурного режима. При транспортировке грузов с регламентированным температурным режимом, особенно фармацевтических препаратов и плодоовощной продукции, соблюдение

Данные для расчета

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Площадь ограждения	A	136,0	м ²
Коэффициент теплопередачи ограждения	k	0,60	Вт/(м ² · К)
Масса помидоров	$g_{гр}$	24 300	кг
Удельная теплоемкость красных помидоров	$c_{гр}$	3895,4	Дж/(кг · К)
Теплопроводность помидоров	λ	0,604	Вт/(м · К)
Холодопроизводительность рефрижераторного контейнера	$Q_{хол}^{\Phi}$	4200	Вт

температурных параметров является критически важным. Обеспечение требуемых температурных условий включает в себя создание и поддержание необходимого температурного режима [3].

Эта проблема отражена в «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. В документе особое внимание уделяется повышению скорости, качества и удобства грузовых отправок благодаря широкому внедрению современных технологий, развитию программы «грузовых деревень» и скоростных контейнерных маршрутов.

В условиях тренда к переходу грузоперевозок на унифицированные рефрижераторные контейнеры [5], а также растущего спроса на автономность транспортных единиц актуальным становится вопрос о разработке новых технических систем обеспечения безопасности термочувствительной продукции. Также следует учитывать и растущие предпочтения потребителей в пользу передовых технологий, таких как применение криогенных жидкостей в качестве топлива и вторичного хладагента. В области контейнерных грузоперевозок такой жидкостью может быть сжиженный природный газ (СПГ) [6, 7]. Однако в открытом доступе практически отсутствуют исследования, определяющие степень влияния СПГ на сохранность грузов.

В работе предлагается методика расчета теплового состояния с получением температурных полей грузов сферической формы в виде решения задачи нестационарной теплопроводности в декартовых координатах, по результатам которой можно дать оценку влияния СПГ на сохранность при перевозке наиболее распространенной плодоовощной продукции.

Для расчета принят автономный 40-футовый рефрижераторный контейнер, заполненный плодоовощами (красными помидорами). Теплофизические характеристики помидоров приняты в соответствии с данными ASHRAE [8]. Расчетные данные приведены в таблице.

Постановка задачи

Автономный рефрижераторный контейнер — универсальный контейнер, оборудованный рефрижераторной установкой и независимым источником питания. Установка контейнера производится на фитинговые платформы, предназначенные для перевозки 40- и 20-футовых контейнеров. В целях ускорения погрузочно-разгрузочных работ перевозимый в контейнерах груз размещается на стандартных паллетах. Расстановка паллет предусматривается с организацией пространства для свободной циркуляции воздуха. Схема типового автономного рефрижераторного контейнера, место размещения рефрижераторной установки и внешнего источника питания приведены на рис. 1.

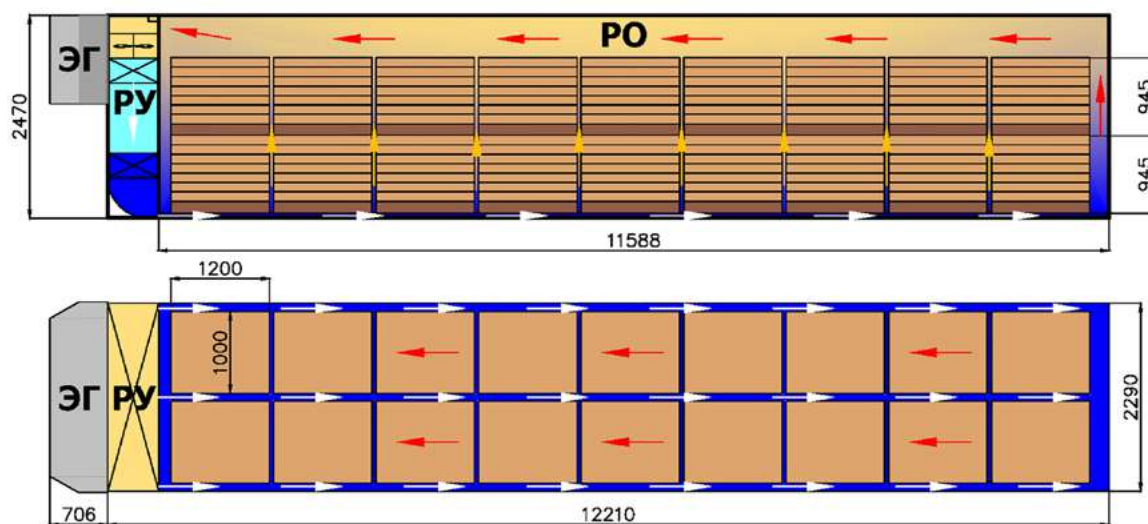


Рис. 1. Схема автономного 40-футового рефрижераторного контейнера:

ЭГ — независимый источник питания, РУ — встроенная рефрижераторная установка, РО — рабочий объем контейнера. Направление течения воздуха в рабочем объеме обозначено стрелками

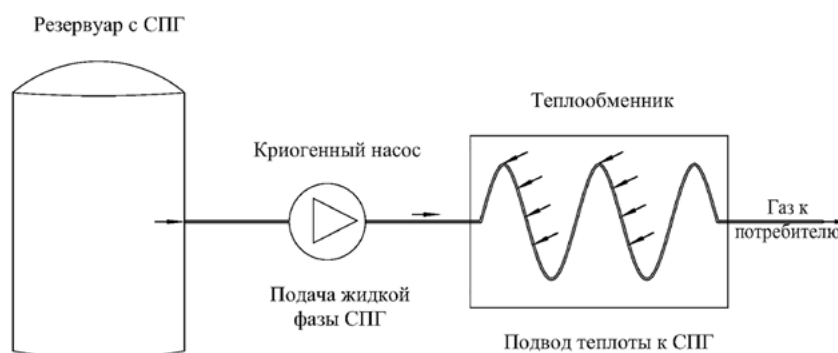


Рис. 2. Схема утилизации холода при регазификации СПГ

Замена дизельного топлива на СПГ открывает возможность полезного использования холода от регазификации (рис. 2). Рекуперация холода осуществляется в теплообменнике змеевикового типа из нержавеющей стали, который устанавливается в грузовом отсеке рефрижераторного контейнера. Данный теплообменник выполняет функцию дополнительного источника холода, снижая нагрузку на компрессор основной установки и обеспечивая компенсацию теплопритоков в аварийных ситуациях.

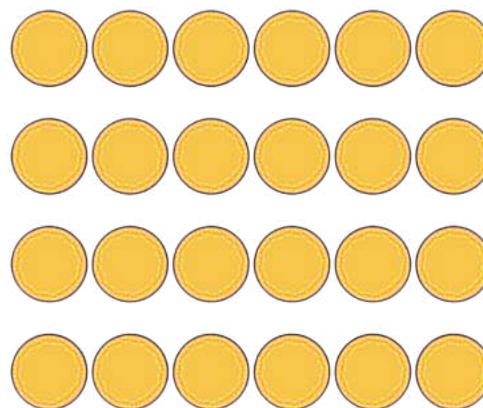
Для перевозки плодоовощей и фруктов используется перфорированная пластиковая и картонная

тара. В случае перевозки при помощи контейнера упаковки объединяются и устанавливаются на паллетах ярусами. Пример упаковки из гофрированного картона и методика укладки красных помидоров представлены на рис. 3.

Распределение температур грузов, перевозимых в рефрижераторных контейнерах, может быть рассмотрено в параметрических и канонических областях декартовой, цилиндрической или сферической системы координат. В большинстве случаев грузы будут представлять собой твердые тела конечных размеров: параллелепипеды, цилиндры и сферы.



а

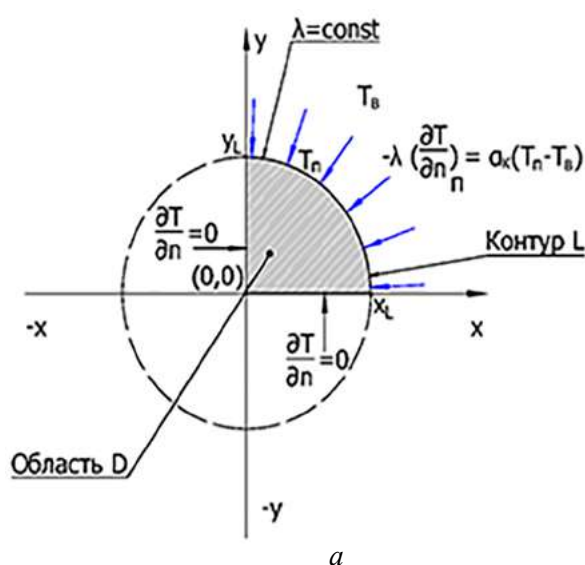


б

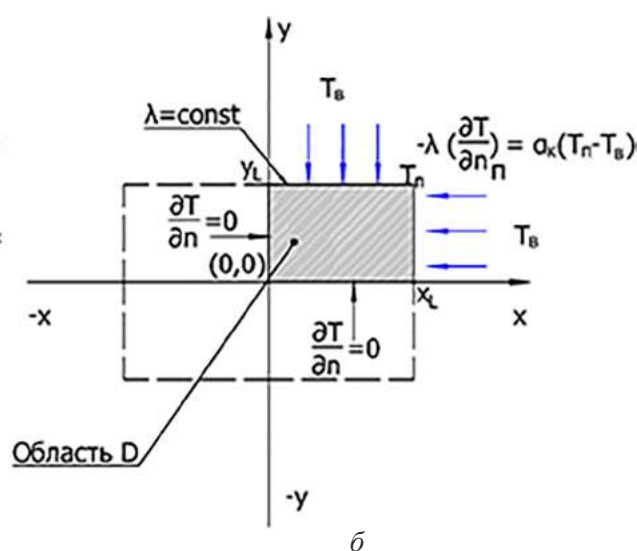
Рис. 3. Внешний вид упаковки и принятая геометрическая модель:
а — упаковка плодоовощей (помидоры); б — геометрическая модель упаковки

Рассмотрим упаковку с плодоовощами (помидорами). С учетом технологических зазоров, образуемых между объектами внутри упаковки при соблюдении технологии укладки, охлаждение каждого объекта в упаковке происходит одинаковым образом. Поскольку отклонениями при охлаждении можно пренебречь, для оценки эффекта охлаждения достаточно проанализировать температурное поле одного из объектов [9].

В расчете принято, что материал объекта однороден, теплообмен на границах происходит равномерно, отсутствуют асимметричные источники теплоты, фазовые переходы исключены, распределение температуры по объекту происходит симметрично — задача сводится к двумерной области. Относительно плоскостей, проходящих через середину объекта, верхняя и нижняя части объекта симметричны, как показано на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Постановка задачи теплопроводности для расчета температурного поля объекта:
а — плодоовощ; б — прямоугольный груз

Рассматриваемая расчетная область D задается как:

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq X_L \\ 0 \leq y \leq Y_L \end{cases} \quad (1)$$

Уравнение процесса теплопроводности в данном случае примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda} = \frac{\lambda}{c\rho} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

Начальные условия:

$$T(x, y) = T_0, \begin{cases} 0 \leq x \leq X_L, x \in D \\ 0 \leq y \leq Y_L, y \in D \end{cases} \quad (3)$$

Граничные условия при охлаждении объекта:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \begin{cases} 0 \leq x \leq X_L \text{ при } y = 0 \\ 0 \leq y \leq Y_L \text{ при } x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = \alpha_k (T_n - T_b) \begin{cases} 0 \leq x \leq X_L, x \in L \\ 0 \leq y \leq Y_L, y \in L \end{cases} \quad (5)$$

где λ — теплопроводность, Вт/(м · К);

c — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);

ρ — плотность, кг/м³;

α_k — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К);

T_b — температура среды (воздуха), К;

T_n — температура поверхности тела, К.

Полученные уравнения и условия формируют замкнутую систему для определения $T(x, y)$ в заданной области D . Температура среды в камеры определяется по формуле:

$$T_b = T_n - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Q_{xi} - \sum_{j=2}^m Q_j \right)}{(kA)}, \quad (6)$$

где Q_{xi} — мощность i -го источника холода, Вт;

$\sum_{j=2}^m Q_j$ — дополнительные теплопритоки, Вт, без

учета теплопритоков через ограждающие конст-

рукции. Для моделирования приняты условия максимальной тепловой нагрузки с учетом постоянных и периодических теплопритоков [10]. Требуемый расход хладагента (СПГ), кг/ч:

$$m_{\text{спг}} = \begin{cases} \Delta Q \frac{3600}{r}, & \text{если } \Delta Q > 0 \\ 0, & \text{если } \Delta Q \leq 0, \end{cases}$$

$$\Delta Q = \sum Q_j - Q_{\text{хол}}^{\Phi}, \quad (7)$$

где r — среднее значение теплоты парообразования хладагента, для метана $r = 511\,000$ Дж/кг; $Q_{\text{хол}}^{\Phi}$ — фактическая холодопроизводительность основной холодильной установки.

$$Q_{\text{хол}}^{\Phi} = \eta(T_n) Q_{x1} = 1 - \alpha(T_n - T_{\text{ном}}) Q_{x1}, \quad (8)$$

где $\alpha = 0,015$ — коэффициент снижения мощности установки, 1/°С;

T_n — фактическая температура среды вне контейнера, °С;

$T_{\text{ном}}$ — температура, при которой холодопроизводительность установки соответствует наибольшему значению из диапазона номинальных, °С.

Моделирование и проверка

Для установления корректности модели охлаждения проведено сопоставление результатов численного моделирования охлаждения плодовоощей (красного помидора) и полученных экспериментальных данных. Эксперимент проведен в климатической камере. Температура плода измерена четырехканальным цифровым регистратором температуры на базе Arduino и датчиков типа ТХА второго класса, погрешность регистратора $\pm 0,3$ °С. Температура воздуха в камере фиксировалась термометром сопротивления РТ100 с погрешностью $\pm 0,1$ °С.

Сравнение проведено для температуры плодовооща в заданной области по трем точкам на поверхности и в центре. Результаты приведены на рис. 5.

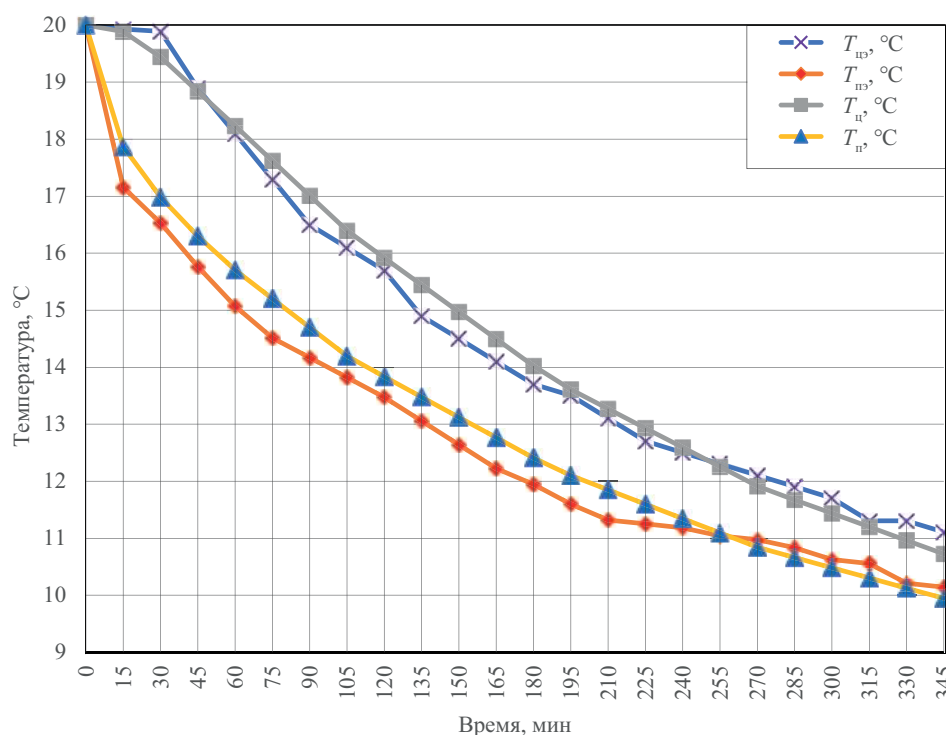


Рис. 5. Сравнение результатов эксперимента с расчетными данными:

$T_{ц}$, $T_{п}$ — расчетные значения модели, °C; $T_{цз}$, $T_{пз}$ — усредненные экспериментальные значения, °C

Как было указано выше, производительность встроенной холодильной установки рефконтейнера с хладагентом R134a составляет 4200 Вт в зависимости от внешних тепловых нагрузок. Температура среды вне контейнера принята $T_n = 35$ °C, температура хранения плодоовощей (красногопомидора) усредненно принята $T_b = 7,5$ °C в соответствии с ГОСТ Р 58664—2019. Суммарные теплопритоки $\sum Q_j = 4460,1$ Вт в контейнер превышают холодопроизводительность основной установки. Тогда, в соответствии с формулой (7), требуемый расход СПГ в качестве дополнительного хладагента составит $m_{спг} = 1,82$ кг/ч. Для оценки воспроизводимости модели и эксперимента были проведены множественные повторения с расчетом статистических показателей согласованности результатов. Анализ воспроизводимости показал низкую вариабельность: стандартное отклонение температур на поверхности плода составило менее 0,3 °C при пятикратном повторении эксперимента ($n = 5$).

Для определения достоверности математической модели расчетные и измеренные температуры сравниваются на основе среднеквадратической ошибки ($RMSE$):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - S_i)^2}. \quad (9)$$

Полученные в результате моделирования и эксперимента кривые согласуются и показывают монотонное охлаждение. Расчетные значения ($T_{ц}$, $T_{п}$) повторяют тренд экспериментальных значений ($T_{цз}$, $T_{пз}$).

Значение средней квадратичной ошибки $RMSE$ варьировалось в диапазоне 0,42 до 0,52 °C. Характер расхождения температур в помидоре обусловлен особенностями нестационарных процессов теплообмена в гетерогенных средах и связан с упрощениями, принятыми при задании граничных условий математической модели.

Полученные значения ошибки говорят об удовлетворительном совпадении расчетных

и экспериментальных данных и согласуются с данными, полученными в ходе аналогичных опытов [11, 12].

Проверка модели

В данной работе сформулирована нестационарная задача теплопроводности для грузов различных форм и произведен расчет расхода хладагента вспомогательной холодильной установки с использованием топливного СПГ для компенсации пиковых теплопритоков, вызванных повышением температуры окружающего контейнер воздуха.

Расчетное значение расхода хладагента 4,23 кг/ч обеспечивает тепловое равновесие внутри контейнера и соответствует расчетным значениям, допустимым для электроснабжения автономного рефрижераторного контейнера [5, 6].

Валидация постановки задачи теплопроводности проверена в результате сравнения численной модели и экспериментальных данных. Проведенное сравнение показало удовлетворительную степень схождения, среднеквадратическая ошибка $RMSE$ усредненных показателей ниже 0,52 °С. Полученное значение не превышает допустимые при перевозке плодоовощей отклонения температуры.

Таким образом, сравнение расчетных и экспериментальных результатов подтверждает адекватность предложенного подхода для прогнозирования динамики охлаждения плодоовощных грузов в автономных контейнерах.

Принятый уровень точности позволяет рекомендовать результаты исследования для оптимизации режимов работы холодильных установок при транспортировке режимных грузов и для дальнейшего совершенствования систем контроля температурных режимов.

Для более точного прогнозирования температуры объектов и полной оценки влияния СПГ на температуру плодоовощей и других режимных грузов в рефрижераторных контейнерах необходимо провести дополнительные исследования.

Список источников

1. Перевозки контейнеров по сети РЖД по итогам 2024 года выросли на 5,9 % до 7,9 млн TEU // InfraNews. — URL: <https://www.infranews.ru/logistika/containeri/66616-perevozki-kontejnerov-po-seti-rzhd-po-itogam-2024-goda-vyrosli-na-5-9-do-7-9-mln-teu/> (дата обращения: 22.06.2025).
2. Перевозки контейнеров по сети РЖД в 2025 году могут достичь 8 млн TEU — ИЭРТ // Сайт ОАО «ОАО» РЖД. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=222971> (дата обращения: 22.06.2025).
3. Тертеров М. Н. Железнодорожный хладотранспорт / М. Н. Тертеров, Н. Е. Лысенко, В. Н. Панферова. — М.: Транспорт, 1987. — 255 с.
4. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. — URL: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения: 22.06.2025).
5. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге «РЖД». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/902325994> (дата обращения: 22.06.2025).
6. Киселев И. Г. О целесообразности использования сжиженного природного газа на рефрижераторных контейнерах с навесными дизель-генераторами / И. Г. Киселев, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 4. — С. 104–113. — DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-104-113.
7. Ворон О. А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). — 2019. — № 3(78). — С. 188–192. — DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192.
8. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Chapter 19 Thermal Properties of Foods, ASHRAE Handbook 2022.
9. Defraeye T. Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics / T. Defraeye, P. Cronjé, P. Verboven, U. L. Opara et al. // Postharvest Biology and Technology. — 2015. — Iss. 108. — Pp. 91–101. — DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.06.004.

10. Ефимов В. В. Теплотехнический расчет рефрижераторных транспортных модулей: метод. указания / В. В. Ефимов. — СПб.: ПГУПС, 2003. — 64 с.

11. Tagliavini G. Multiphysics modeling of convective cooling of non-spherical, multi-material fruit to unveil its quality evolution throughout the cold chain / G. Tagliavini, T. Defraeye, J. Carmeliet // *Food and Bioprocess Processing*. — 2019. — Iss. 117. — Pp. 310–320. — DOI: 10.1016/j.fbp.2019.07.013.

12. Chen Y.-M. Sensitivity analysis of heat and mass transfer characteristics during forced-air cooling process of peaches on different air-inflow velocities / Y.-M. Chen, H.-Y. Song, Z.-S. Chen, R. Zhao et al. // *Food Science & Nutrition*. — 2020. — Vol. 8. — Iss. 12. — Pp. 6592–6602. — DOI: 10.1002/fsn3.1951.

Дата поступления: 23.07.2025

Решение о публикации: 01.09.2025

Контактная информация:

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич — д-р техн. наук, проф.;
tatkiselev4.igor@yandex.ru

ГАЛОВ Владимир Викторович — канд. техн. наук,
доц.; v_galov@hotmail.com

КУДРИН Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, доц.;
kudrin-mik@list.ru

МОНАСТЫРСКИЙ Дмитрий Ярославович —
аспирант; swen_88@mail.ru

Determining Temperature Fields of Various Cargo Transported in Autonomous Refrigerated Containers Using Liquefied Natural Gas (LNG) Cooling

I. G. Kiselev, V. V. Galov, M. Yu. Kudrin, D. Ya. Monastyrsky

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

For citation: Kiselev I. G., Galov V. V., Kudrin M. Yu., Monastyrsky D. Ya. Determining Temperature Fields of Various Cargo Transported in Autonomous Refrigerated Containers Using Liquefied Natural Gas (LNG) Cooling // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 938–946. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-938-946

Summary

Purpose: To develop a methodology for assessing cargo thermal condition by determining the temperature fields of various temperature-regulated goods during their transportation in autonomous refrigerated containers using liquefied natural gas (LNG). To validate the model experimentally. To determine a method for calculating the required LNG consumption for establishing thermal equilibrium in the container. **Methods:** The determination of the cargo temperature fields was reduced to solving a heat conduction problem in a two-dimensional domain with third-kind boundary conditions and to obtaining the corresponding temperature fields. The method for calculating the LNG consumption to maintain thermal equilibrium was developed based on the heat balance method. **Results:** A mathematical model describing the heat exchange in cargo during transportation in an autonomous refrigerated container using LNG cooling has been developed and experimentally validated. A method for calculating LNG consumption to compensate for excessive heat gains has been formulated. The calculations and resulting temperature fields have been presented for a transportation scenario involving fruits and vegetables. **Practical significance:** The findings of this study can be used to optimize refrigerated transport conditions and to develop new container cooling systems using LNG as an auxiliary cooling source.

Keywords: Autonomous refrigerated containers, cooling, refrigerated transportation, liquefied natural gas, temperature fields.

References

1. *Perevozki konteynerov po seti RZhD po itogam 2024 goda vyrosli na 5,9% do 7,9 mln TEU* [Container transportation through the RZD network increased by 5.9% to 7.9 million TEU in 2024]. InfraNews. Available at: <https://www.infranews.ru/logistika/containeri/66616-perevozki-konteynerov-po-seti-rzhd-po-itogam-2024-goda-vyrosli-na-5-9-do-7-9-mln-teu/> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
2. *Perevozki konteynerov po seti RZhD v 2025 godu mogut dostich' 8 mln TEU — IERT* [Container transportation through the RZD network in 2025 may reach 8 million TEU — IERT]. RZD website. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=222971> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
3. Terterov M. N., Lysenko N. E., Panferova V. N. *Zheleznodorozhnyy khladotransport* [Railway cold transport]. Moscow: Transport Publ., 1987, 255 p. (In Russian)
4. *Transportnaya strategiya RF na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda* [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035]. Available at: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
5. *Kontseptsiya kompleksnogo razvitiya konteynernogo biznesa v kholdinge "RZhD"* [Concept of integrated development of container business in the RZD holding]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902325994> (accessed: June 22, 2025). (In Russian)
6. Kiselev I. G., Komissarov S. B., Monastyrskiy D. Ya. *O tselesoobraznosti ispol'zovaniya szhizhennogo prirodnogo gaza na refrizheratornykh konteynerakh s navesnymi dizel'-generatorami* [On the feasibility of using liquefied natural gas in refrigerated containers with mounted diesel generators]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2021, Iss. 4, pp. 104–113. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-104-113. (In Russian)
7. Voron O. A. *Ispol'zovanie szhizhennogo prirodnogo gaza v kombinirovannoy energosilovoy ustanovke avtonomnogo refrizheratornogo vagona* [Use of liquefied natural gas in a combined power plant of an autonomous refrigerated car]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (VESTNIK VNIIZhT)* [Bulletin of Railway Research Institute]. 2019, Iss. 3(78), pp. 188–192. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192. (In Russian)
8. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Chapter 19 Thermal Properties of Foods, ASHRAE Handbook 2022.
9. Defraeye T., Cronjé P., Verboven P., Opara U. L. et al. Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, Iss. 108, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.06.004.
10. Efimov V. V. *Teplotekhnicheskiiy raschet refrizheratornykh transportnykh moduley: metodicheskie ukazaniya* [Thermal calculation of refrigerated transport modules: methodical guidelines]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2003, 64 p. (In Russian)
11. Tagliavini G., Defraeye T., Carmeliet J. Multiphysics modeling of convective cooling of non-spherical, multi-material fruit to unveil its quality evolution throughout the cold chain. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, Iss. 117, pp. 310–320. DOI: 10.1016/j.fbp.2019.07.013.
12. Chen Y.-M., Song H.-Y., Chen Z.-S., Zhao R. et al. Sensitivity analysis of heat and mass transfer characteristics during forced-air cooling process of peaches on different air-inflow velocities. *Food Science & Nutrition*. 2020, vol. 8, Iss. 12, pp. 6592–6602. DOI: 10.1002/fsn3.1951.

Received: July 23, 2025

Accepted: September 01, 2025

Author's information:

Igor I. KISELEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; tatkiselev4.igor@yandex.ru

Vladimir V. GALOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v_galov@hotmail.com

Michael Yu. KUDRIN — PhD in Engineering, Associate Professor; kudrin-mik@list.ru

Dmitrii Ya. MONASTYRSKII — Postgraduate Student; swen_88@mail.ru

УДК 624.19.035.2

Анализ аварийных ситуаций при сооружении автодорожных тоннелей горным способом в инженерно-геологических условиях г. Сочи

В. Н. Кавказский¹, Е. А. Ермонин¹, Л. А. Андреева²

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

²ФГБУ «Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России», Российская Федерация, 119331, Москва, пр-кт Вернадского, 29

Для цитирования: Кавказский В. Н., Ермонин Е. А., Андреева Л. А. Анализ аварийных ситуаций при сооружении автодорожных тоннелей горным способом в инженерно-геологических условиях г. Сочи // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 947–957. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-947-957

Аннотация

Цель: Цель выполненного исследования — обобщить и классифицировать риски, возникшие при строительстве Дублера Курортного проспекта — ключевого олимпийского инфраструктурного объекта, включавшего 15 автодорожных тоннелей общей длиной 13 км. **Методы:** Теоретического уровня, основанные на анализе ранее выполненных натурных работ, сборе фактов и их проверке, систематизации, выявлении зависимостей и определении причинно-следственных связей. **Результаты:** Проведенный анализ позволит получить обобщенную информацию о рисках и причинах их возникновения для проектирования тоннельных сооружений, сооружаемых горным способом, на черноморском побережье Краснодарского края. Разобраны основные аварийные ситуации, связанные с технологическими особенностями в конкретных инженерно-геологических условиях. **Практическая значимость:** Установлены основные пробелы в нормативной документации.

Ключевые слова: Автодорожный тоннель, горный способ, риски, проходка тоннелей, проектирование тоннелей.

Статья посвящена анализу основных аварийных ситуаций, возникших при строительстве Дублера Курортного проспекта в Сочи — масштабного инфраструктурного проекта, включающего 15 автодорожных тоннелей общей протяженностью 13 км [1, 2].

Рассмотрены причины аварийных ситуаций, связанных со сложными инженерно-геологическими условиями (малопрочные полускальные грунты, высокая сейсмичность), и предложены меры по их предотвращению. Полученные выводы актуальны для будущих проектов, включая развитие проекта «Южный кластер», где ожидаются аналогичные вызовы.

Современная геополитическая ситуация способствует активному росту туристического потока по всему северо-восточному побережью Черного моря. Это обстоятельство требует комплексного развития транспортной инфраструктуры в целом и автодорожной в частности. В условиях ограниченного пространства между горными массивами и Черноморским побережьем ключевым решением становится прокладка автодорожных магистралей в горной местности.

В настоящее время разрабатывается масштабный инфраструктурный проект с рабочим названием «Южный кластер» протяженностью 152,5 км (рис. 1).



Рис. 1. Схема проекта автодорожной магистрали «Южный кластер» [3]

Трасса пройдет по уникальной схеме:

- начальный участок от М-4 «Дон» (район Горячего Ключа) через горный перевал до Туапсе;
- прибрежный сегмент — далее трассу предполагается проложить вдоль Черноморского побережья до аэропорта Адлер;
- дополнительная ветка от города Горячий Ключ до села Агой [3].

Проект предусматривает следующие технические особенности:

- прокладка трассы в сложных инженерно-геологических условиях (малопрочные полускальные грунты, обводненные зоны);
- высокая сейсмичность региона (до 9 баллов);
- сохранение экосистемы Черноморского побережья.

Реализация проекта позволит:

- увеличить пропускную способность транспортной сети региона на 40–45 %;
- сократить время в пути между ключевыми точками на 30–35 %;

- обеспечить безопасность движения в сложных погодных условиях;
- снизить антропогенную нагрузку на прибрежные экосистемы.

«Южный кластер» станет образцом современного инфраструктурного строительства, сочетающего инженерные инновации с бережным отношением к уникальной природе Черноморского побережья. Опыт реализации этого проекта может быть тиражирован на других сложных участках транспортной сети России.

Для успешного решения этих задач критически важен опыт, полученный при строительстве Дублера Курортного проспекта — ключевого олимпийского инфраструктурного объекта, включавшего 15 автодорожных тоннелей общей длиной 13 км.

Схема расположения трассы представлена на рис. 2. Общие характеристики тоннелей приведены в табл. 1.

Все тоннели сооружались горным способом. Различные вариации уступных методов строительства тоннелей Дублера Курортного про-

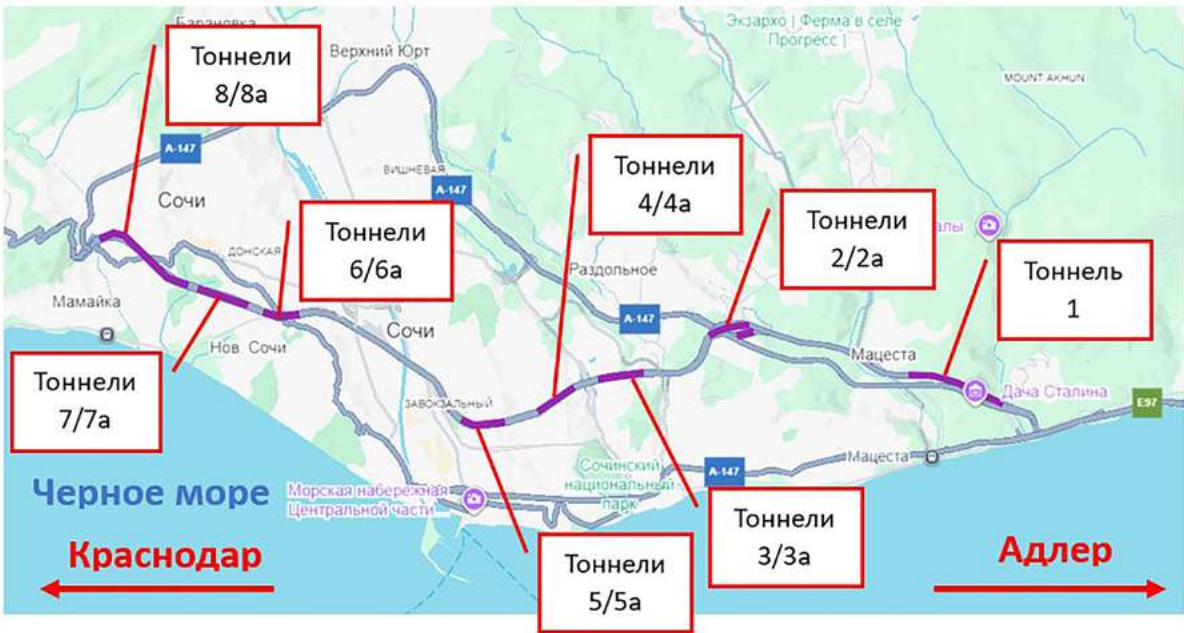


Рис. 2. Схема Дублера Курортного проспекта в Центральном районе г. Сочи, построенного к XXII зимним Олимпийским играм

Таблица 1. Автодорожные тоннели Дублера Курортного проспекта

№ тоннеля	Длина, м	Число полос	Способ строительства
1	1472,5	2 · 3,75 м	Встречными забоями способом опертого свода в три уступа
2, 2a	672,0		
	259,2		
3, 3a	660,8		Встречными забоями способом опертого свода в два уступа
	683,5		
4, 4a	668,4		Встречными забоями способом опертого свода в три уступа
	669,4		
5, 5a	670,5		
	695,7		Встречными забоями способом опертого свода в два уступа
6, 6a	554,8		
	564,1		
7, 7a	804,2		
	824,2		
8, 8a	1561,9		Полным сечением с предварительным укреплением грунтового массива (ADECO-RS)
	1538,1		

спекта обеспечивали скорость проходки 40–60 м в месяц. Показатель зависел от:

- сложности инженерно-геологических условий;
- типа временной крепи;
- наличия или отсутствия специальных способов строительства.

Так, парные тоннели № 5/5a суммарной длиной 1365 м были пройдены за 24 месяца (57 м в месяц). Использование метода ADECO-RS при строительстве тоннелей № 8/8a позволило увеличить скорость проходки полным сечением до 80 м в месяц [5].



Рис. 3. Панорама северного портала автодорожных тоннелей № 5/5а
Дублера Курортного проспекта г. Сочи [4]

Таблица 2. Характеристики инцидентов и зоны их возникновения

Зона возникновения	Количество	Доля, %	Характерные последствия
Портальные участки	5	38	Оползневые смещения, деформации крепей
Призабойная зона	4	31	Вывалы грунта, обрушения временной крепи
Участки сопряжения	3	23	Трещинообразование в обделке
В тоннеле	1	8	Локальные просадки

В ходе сооружения тоннелей по трассе Дублера Курортного проспекта было зафиксировано 13 аварийных инцидентов (табл. 2).

Основными причинами инцидентов на портальных участках являются сложные геологические условия. Большинство порталов расположены в зонах активных оползней, устойчивость которых зависит от наличия водоносных прослоев в глинистых грунтах. Сложность этих условий отягощается технологическими нарушениями при строительстве [6, 7]. В частности, в четырех случаях из пяти сползание склона вызвано преждевременной подрезкой склонов и несоблюдением проектных решений по анкерному креплению откосов предпортальных выемок. Немаловажной проблемой является и отсутствие

временного водоотведения. Гидродинамический выпор грунта являлся причиной возникновения оползней в трех случаях из пяти. Типичный сценарий развития аварийной ситуации, вызванный обводнением грунта, следующий. Скрытое насыщение устойчивого откоса грунтовыми водами (зачастую вызванное стихийным устройством несанкционированных систем водоотведения городской застройки). Процесс развития оползня составляет до 2–5 см/час. Эти изменения приводят к развитию глубины зоны разрушения до трех диаметров тоннеля. Вышеуказанные процессы отражаются на устойчивости основания порталов и вызывают размягчение контакта между грунтом и крепью, снижение адгезии набрызгбетона на 40–60 % и, как следствие, создают опасность



Рис. 4. Проходка и крепление калотты автодорожного тоннеля № 5 Дублера Курортного проспекта г. Сочи (фото: Е. А. Ермолина)



Рис. 5. Общий вид стройплощадки северного портала строительства автодорожных тоннелей № 6/6а Дублера Курортного проспекта г. Сочи (фото: Е. А. Ермолина)



Рис. 6. Деформация жилого дома на порталном участке строительства автодорожных тоннелей № 8/8а Дублера Курортного проспекта в г. Сочи [8]

Таблица 3. Последствия и ущерб от инцидентов на порталных участках

Параметр	Среднее значение	Максимальные показатели
Смещение портала	12–18 см	35 см (тоннель № 4а)
Время восстановления	14–21 день	47 дней
Доп. затраты в ценах 2014 г.	8–12 млн руб.	28 млн руб.



Рис. 7. Обрушение забоя при строительстве автодорожного тоннеля № 2 Дублера Курортного проспекта в г. Сочи (фото: Е. А. Ермнина)



Рис. 8. Воронка обрушения на северном портале автодорожного тоннеля № 2 Дублера Курортного проспекта в г. Сочи, обусловленная прорывом напорного канализационного коллектора (фото: Е. А. Ермолина)

Таблица 4. Последствия и ущерб от инцидентов в призабойной зоне

Параметр	Средние значения	Максимальные показатели
Объем вывала	8–12 м ³	25 м ³ (тоннель № 6а)
Время простоя	3–5 дней	11 дней
Дополнительные затраты в ценах 2014 г.	4–6 млн руб.	15 млн руб.

обрушения контура выработки. Последствия и ущерб приведены в табл. 3.

Анализ инцидентов в призабойной зоне тоннелей (4 инцидента — 31 % от общего количества) показал, что основными типами разрушений являются внезапные вывалы грунта (3 случая) и обрушение временной крепи (1 случай). Все инциденты произошли в 5–15 м от забоя. Основными причинами возникновения вывалов являются наличие песчаных линз в глинистых грунтах (в 75 % случаев) и переувлажнение мас-

сива в кровле выработки [9]. В ходе ликвидации последствий аварийных ситуаций был выявлен ряд нарушений технологического характера. Установлено превышение допустимого отставания крепи ($>1,2$ пролета выработки), соответствие плотности анкерного поля ($<0,8$ анкеров/м²), применение набрызгбетона классом ниже В20. Последствия инцидентов приведены в табл. 4.

Анализ трещинообразования в обделке на участках сопряжения тоннелей. Зафиксировано три случая образования трещин: два случая с рас-

Таблица 5. Объемы работ и ущерб от локальной просадки тоннеля

Параметр	Значение
Выемка поврежденного грунта	28 м ³
Цементация основания	32 м ³
Устройство 9 буроинъекционных свай	10 м ³
Восстановление обделки	6 м ³
Сроки ликвидации	37 дней
Затраты	14,7 млн руб.
Снижение несущей способности	12 % → восстановлено до 95 %

крытием радиальных трещин до 8 мм и один случай с кольцевым раскрытием трещины до 12 мм. Обозначенные дефекты зафиксированы в стыках тоннельных секций и в зоне примыкания к порталу. Причинами возникновения трещин являются недостаточная жесткость стыковых узлов, перепад толщин обделки (от 35 до 25 см), преждевременная нагрузка на недозревший бетон.

Анализ инцидента с локальными просадками в тоннеле. Единственный случай зафиксирован в тоннеле № 7 между пикетами 145–148 при глубине заложения данного участка 22 м от поверхности. Выявлена просадка тоннельной обделки до 9 см. Причиной возникновения осадок стала карстовая полость диаметром 1,8 м в известняках. Для ликвидации полости было произведено нагнетание 28 м³ цементного раствора, устройство 9 буроинъекционных свай (Ø 300 мм, $L = 15$ м). Внутри выработки выполнен монтаж стальной арочной конструкции (профиль 20 ШС) и дополнительный слой набрызгбетона В30 толщиной 12 мм. Последствия данного инцидента вызвали необходимость внедрения системы волоконно-оптического контроля и ежемесячного геодезического мониторинга. Последствия инцидента приведены в табл. 5.

Заключение

Анализ причин аварий позволяет лучше понять закономерности в работе тоннельных сооружений, выявить недостатки проектных решений, разработать меры по предупреждению аварий и повысить надежность сооружений.

В контексте строительства «Южного кластера» в аналогичных инженерно-геологических условиях проведенное исследование приобретает особую значимость.

По результатам исследования выявлены следующие ключевые выводы. Наибольшие проблемы зафиксированы при разработке и креплении предпортальных выемок. Критические ситуации возникали на участках врезки тоннеля.

Экономический анализ показывает: прямые дополнительные затраты на ликвидацию аварий при строительстве дублера Курортного проспекта составили около 200 млн руб. (в ценах 2014 г.). В ценах 2025 г. эта сумма эквивалентна 450–500 млн руб., что составляет примерно 1,2 % от стоимости строительно-монтажных работ.

Несмотря на относительно небольшой процент, абсолютные значения потерь значительны, не учитывая косвенные затраты и задержки сроков реализации проекта.

Анализ также показал, что до 80 % аварийных ситуаций можно было предотвратить при условии внедрения современных систем мониторинга (лидар, георадар, аэрофотосъемка, волоконно-оптический контроль) и строгого соблюдения проектных решений на всех этапах строительства.

В связи с этим рекомендуется:

1. Разработать и внедрить специализированный свод правил (СП) «Мониторинг технического состояния и управление рисками при строительстве и эксплуатации тоннелей». Доку-

мент должен включать обязательные требования к мониторингу, применению современных методов контроля и управлению рисками на всех этапах жизненного цикла тоннельных сооружений.

2. Включить в состав проектной документации обязательный раздел по оценке рисков аварийных ситуаций и их экономических последствий. Раздел должен содержать анализ прямых и косвенных затрат, а также сравнение с расходами на внедрение превентивных мер.

Проведенная работа и полученные результаты подчеркивают экономическую и инженерную целесообразность внедрения современных технологий мониторинга и совершенствования нормативной базы. Это необходимо для повышения надежности и безопасности тоннельных сооружений, особенно при реализации масштабных инфраструктурных проектов в сложных инженерно-геологических условиях.

Список источников

1. Стройпроект. Три десятилетия. 1990–2020. — URL: <https://www.stpr.ru/upload/iblock/020/zcmb98m54647mld1j1pbdyk7vnu2hu/Книга%20к%2030-летию.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).
2. Ермонин Е. А. Использование β -метода при расчете тоннелей, сооружаемых горным способом / Е. А. Ермонин. — 2020. — URL: <https://geoinfo.ru/product/ermonin-evgenij-alekseevich/ispolzovanie-metoda-pri-raschete-tonnelej-sooruzhaemyh-gornym-sposobom-43544.shtml> (дата обращения: 15.06.2025).
3. Ведомости. — URL: <https://www.vedomosti.ru/realty/articles/2018/08/02/777065-krasnodarskom-krae-doroga-moryu> (дата обращения: 15.06.2025).
4. ФКУ Упрдор «Черноморье». — URL: <https://chnm.rosavtodor.gov.ru/departament/press-center/novosti/672181> (дата обращения: 15.06.2025).
5. Lunardi P. Full-face excavation in difficult ground / P. Lunardi, G. Barla // *Journal of Geomechanik und Tunnelbau*. — 2014. — Vol. 7. — Iss. 5. — Pp. 461–468. — DOI: 10.1002/geot.201400037. — URL: https://www.researchgate.net/publication/266378833_Full_face_excavation_in_difficult_ground (дата обращения: 15.06.2025).
6. Куликова Е. Ю. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений / Е. Ю. Куликова, А. Г. Полянкин, А. М. Поткина // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 264. — С. 895–905.
7. Кауфман, Л. Л. Опыт оценки рисков подземного строительства / Л. Л. Кауфман, Б. А. Лысыков, К. И. Заполова, И. Ж. Сирачев // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. — 2010. — № 32. — С. 55–60. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-otsenki-riskov-podzemnogo-stroitelstva/viewer> (дата обращения: 15.06.2025).
8. Livejournal. — URL: <https://fotoserg.livejournal.com/67057.html> (дата обращения: 15.06.2025).
9. Proprenter M. Risk Management in Tunnelling — A Joint Approach of all Involved / M. Proprenter, G. Lenz // *ITA Library*. — URL: https://ic-group.org/fileadmin/Magazin_PDFs/2018_WTC_Risk_Management_PROPRENTER_LENZ.pdf (дата обращения: 15.06.2025).

Дата поступления: 17.08.2025

Решение о публикации: 03.10.2025

Контактная информация:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доц.; kavkazskiy_vn@mail.ru
АНДРЕЕВА Людмила Александровна — д-р техн. наук; andreeva4you@yandex.ru
ЕРМОНИН Евгений Алесеевич — аспирант; eermonin@bk.ru

Analysis of Emergency Situations During the Construction of Road Tunnels by Mining Methods in the Engineering-Geological Conditions of the Town of Sochi

V. N. Kavkazsky¹, E. A. Ermonin¹, L. A. Andreeva²

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

²Branch FSBI “TsNIIP Minstroy Russia”, 29, Vernadsky pr., Moscow, 119331, Russian Federation

For citation: Kavkazsky V. N., Ermonin E. A., Andreeva L. A. Analysis of Emergency Situations During the Construction of Road Tunnels by Mining Methods in the Engineering-Geological Conditions of the town of Sochi // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 947–957. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-947-957

Summary

Purpose: To generalize and classify the risks that arose during the construction of the Kurortny Prospekt bypass, a key Olympic infrastructure facility. It included 15 road tunnels with a total length of 13 km. **Methods:** Theoretical studies of the previously completed fieldwork, fact-finding and verification, systematisation, followed by identification of correlations, and determination of cause-and-effect relationships. **Results:** This analysis will provide a comprehensive overview of the risks and their causes associated with the design of tunnels excavated by mining methods along the Black Sea coast of Krasnodar region. This paper examines major emergencies stemming from the specific engineering and geological conditions present in a particular area. **Practical significance:** The main gaps in the regulatory documentation have been identified.

Keywords: Road tunnel, mining method, risks, tunnel boring, tunnel design.

References

1. *Stroyproekt. Tri desyatiletiya. 1990–2020* [Construction project. Thirty years. 1990–2020]. Available at: <https://www.stpr.ru/upload/iblock/020/zcmb98m54647mljd1j1pb-dyk7vnuv2hu/Книга%20к%2030-летию.pdf> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
2. Ermonin E. A. *Ispol'zovanie β -metoda pri raschete tonneley, sooruzhaemykh gornym sposobom* [Using the β -method in calculating tunnels constructed by mining method]. 2020. Available at: <https://geoinfo.ru/product/ermonin-evgenij-alekseevich/ispolzovanie-metoda-pri-raschete-tonnelej-sooruzhaemykh-gornym-sposobom-43544.shtml> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
3. *Vedomosti*. Available at: <https://www.vedomosti.ru/realty/articles/2018/08/02/777065-krasnodarskom-krae-doroga-moryu> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
4. *FKU Uprдор “Chernomor’e”* [Federal Public Institution Road Directorate “Black Sea”]. Available at: <https://chnm.rosavtodor.gov.ru/departament/press-center/novosti/672181> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
5. Lunardi P., Barla G. Full-face excavation in difficult ground. *Journal of Geomechanik und Tunnelbau*, 2014, vol. 7, Iss. 5, pp. 461–468. DOI: 10.1002/geot.201400037. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266378833_Full_face_excavation_in_difficult_ground (accessed: June 15, 2025).
6. Kulikova E. Yu., Polyankin A. G., Potokina A. M. Spetsifika upravleniya geotekhnicheskimi riskami pri proektirovanii podzemnykh sooruzheniy [Specific features of geotechnical risk management in underground construction design]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. 2023, vol. 264, pp. 895–905. (In Russian)

7. Kaufman L. L., Lysikov B. A., Zapolova K. I., Sirachev I. Zh. Opyt otsenki riskov podzemnogo stroitel'stva [Experience in assessing underground construction risks]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. 2010, Iss. 32, pp. 55–60. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-otsenki-riskov-podzemnogo-stroitelstva/viewer> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
8. *Livejournal*. Available at: <https://fotoserg.livejournal.com/67057.html> (accessed: June 15, 2025).
9. Proprenter M., Lenz G. Risk Management in Tunneling — A Joint Approach of all Involved. ITA Library.

Available at: https://ic-group.org/fileadmin/Magazin_PDFs/2018_WTC_Risk_Management_PROPRENTER_LENZ.pdf (accessed: June 15, 2025).

Received: August 17, 2025

Accepted: October 03, 2025

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZSKY — PhD in Engineering,
Associate Professor; kavkazskiy_vn@mail.ru

Ludmila A. ANDREEVA — Dr. Sci. in Engineering;
andreeva4you@yandex.ru

Evgeniy A. ERMONIN — Postgraduate Student;
eermonin@bk.ru

УДК 621.31

Несовершенства расчетных моделей электроэнергии и мощности на тягу поездов в программном пакете КОРТЭС

А. Ю. Сулимин, М. А. Иванов

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

Для цитирования: Сулимин А. Ю., Иванов М. А. Несовершенства расчетных моделей электроэнергии и мощности на тягу поездов в программном пакете КОРТЭС // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 958–966. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-958-966

Аннотация

Цель: В настоящее время существует целый ряд программных пакетов для реализации множества задач в области электроснабжения железных дорог. Правильный и точный учет электроэнергии и мощности значительно влияет на дальнейшее проектирование новых участков железной дороги или реконструкцию старых. В работе предлагается осветить проблемы расчетов расхода электроэнергии и мощности на тягу поездов в программном пакете КОРТЭС для дальнейших исследований и поиска решения. **Методы:** Исследование проводится на основе моделирования движения поездов и работы системы тягового электроснабжения в программном пакете КОРТЭС, анализа полученных результатов и сравнения их с расчетами, выполненными на более совершенной математической модели, которая построена на базе пакета MATLAB-Simulink. **Результаты:** Выявлены основные проблемы расчетов расхода электроэнергии и мощности на тягу поездов. Выявлен существенный недостаток — отсутствие учета величины напряжения на токоприемнике. При помощи моделирования в программном пакете КОРТЭС электрических и тяговых расчетов при различных исходных данных были выявлены несоответствия в математических моделях исследуемого программного пакета. В работе также представлены пути решения указанной проблемы. **Практическая значимость:** Работа имеет важное значение для дальнейших исследований в области расчетов системы тягового электроснабжения, усовершенствования математических моделей для повышения энергоэффективности, безопасности и экономичности разрабатываемых решений, а также для новых перспективных направлений исследования благодаря более точному аппарату расчетов и моделирования.

Ключевые слова: Программный пакет, расчет электроэнергии, проблемы расчетов, несовершенство математической модели, совершенствование программного пакета, модернизация методов расчета.

Введение

В период освоения новых технологий в области железнодорожного транспорта, изобретения нового электроподвижного состава, новых более мощных агрегатов тягового электроснабжения и более эффективных схем внешнего питания, приоритет на развитие и строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей с возможностью перехода в новую эпоху высоких скоростей движения на железных дорогах

страны, остро стоит вопрос о правильности расчетных моделей и программных пакетов для комплексного моделирования системы тягового электроснабжения.

В настоящее время существует большое количество программных пакетов, однако в большинстве своем они корректно справляются с поставленными задачами только в определенных частных условиях, что ограничивает запросы при проектировании.

Существующий наиболее полный программный пакет «Комплекс расчетов тягового электрооборудования» (КОРТЭС), разработанный ВНИИЖТ как преемник программного пакета NORD и его подпрограмм, вобрал в себя различные функции: тяговые расчеты, электрические расчеты, учет графика движения поездов, режима рекуперации, возможность выбора параметров тяговой сети и подвижного состава, расчет режимов плавления гололеда и многое другое.

Однако в связи с рядом проблем в ходе модернизации КОРТЭС до сих пор работает в некоторых функциях по упрощенным моделям с рядом допущений.

Подобные несовершенства КОРТЭС в прошлом не влияли в значительной степени на последующее проектирование, однако в настоящее время точность и корректность расчетов стоят в начале списка задач современного проектировщика-инженера.

В настоящей работе предлагается осветить проблему некорректного расчета расхода электрической энергии и мощности, подробно углубиться в процесс моделирования, а также разработать новые методы расчета мгновенных схем.

Общая часть

Для демонстрации описанных ранее проблем было проведено моделирование при различных исходных параметрах напряжения холостого хода при одинаковых прочих параметрах.

Идея демонстрации заключается в соотношении выходных параметров потерь электрической энергии, полученных при электрических расчетах для сформированного графика движения поездов, и параметров расхода электрической энергии на тягу одного состава по результатам тяговых расчетов.

В качестве исходных данных для моделирования в программном пакете КОРТЭС были использованы:

- участок Санкт-Петербург-Балтийский вокзал — Ораниенбаум;
- электроподвижной состав (ЭПС) — ЭС2Г «Ласточка» (8 вагонов, из них 3 моторных);
- график движения поездов (ГДП), созданный на 30 пар поездов с интервалом следования 10 минут в обе стороны;
- тяговые подстанции (ТП) — Броневая, Лигово, Ст. Петергоф и Лебяжье.

Для корректной демонстрации было проведено трехкратное моделирование при изменении напряжения холостого хода на тяговых подстанциях от 3400 до 3700 В с шагом в 100 В. Результаты моделирования электрических расчетов представлены в табл. 1.

Результаты тяговых нагрузок для одного поезда в ходе моделирования представлены на рис. 1.

По результатам моделирования в программном пакете КОРТЭС потери в тяговой сети не изменялись, при этом итоговый расход на ТП отличается при разных значениях напряжения холостого хода на ТП. Расход электроэнергии рассчитывается по формуле ниже:

$$W_{\Sigma} = (1232,2 + 1186,3)30 + 5063 = \\ = 72\,555 + 5063 = 77\,618 (\text{кВт} \cdot \text{ч}),$$

где 1232,2 и 1186,3 — расход электроэнергии одного поезда, нечетного и четного направления соответственно, кВт·ч (по рис. 1);

30 — количество пар поездов, шт.;

5063 — потери в тяговой сети, полученные на основе электрических расчетов в программном пакете КОРТЭС, кВт·ч.

Результаты по итогам моделирования 1–3 отличаются от значений, полученных по результатам тяговых расчетов, и потерь электрической энергии соответственно на 0,06 %, 3,06, 6,18 и 9,29 %.

Такое положение вызвано тем, что в пакете КОРТЭС тяговая нагрузка задается током, полученным из тяговых расчетов при номинальном напряже-

Таблица 1. Результаты моделирования КОРТЭС

№ моделирования	1	2	3	4
Напряжение х.х. на ТП, В	3400	3500	3600	3700
Расход на тягу поездов, кВт·ч	72 511	74 930	77 349	79 768
Потери в ТС, кВт·ч	5063	5063	5063	5063
Расход на ТП, кВт·ч	77 574	79 993	82 412	84 831

Параметры тяговой нагрузки

Файл: СПб-Калище_8вг_0.9.k3

Род тока: Постоянный, 3 кВ

Период усреднения тока, мин: 0,25

Примечание:

Направление	Категория поезда	Участок движения	Длина, км	Масса, т	Время хода, мин	Расход энергии, кВт·ч / кВ·А·ч	Уд. расход, Вт·ч/т·км	Рекуперация, кВт·ч / %
Нечт.	Приг.	С-Петербург-Балт. – Ораниенбаум	39,3	465	37,8	1232,2 –	67,5	– –
Чётн.	Приг.	Ораниенбаум – С-Петербург-Балт.	39,3	465	40,3	1186,3 –	64,9	– –

Рис. 1. Удельный расход электроэнергии на тягу поездов по результатам электрических расчетов

нии 3000 В. При этом фактическое напряжение на токоприемнике не учитывается. В результате изменение напряжения холостого хода тяговых подстанций на величину ΔU приводит к тому, что напряжение на токоприемниках электроподвижного состава меняется на ту же самую величину ΔU . При этом будет меняться и расход энергии. Вместе с тем из [1] известно, что расход энергии на тягу зависит в основном от массы поезда, профиля и плана пути, а также от количества остановок и разгонов. Напряжение на токоприемнике крайне незначительно влияет на этот расход. Более того, в работах [2] и [3] как теоретически, так и по результатам экспериментов установлено, что при повышении напряжения расход энергии с шин тяговых подстанций, наоборот, будет снижаться. Указанную особенность в пакете КОРТЭС можно попытаться преодолеть, если откорректировать расчетный расход энергии, оттолкнувшись от расхода энергии одного поезда, количества поездов, проследовавших по расчетному участку, и потерь энергии в тяговой сети.

Однако этот способ не учитывает возможного изменения распределения нагрузок между тяговыми подстанциями из-за разности их внутренних сопротивлений.

Потери энергии в тяговой сети также не останутся постоянными, так как при повышении среднего напряжения на ЭПС токи в тяговой сети будут снижаться, а вместе с ними уменьшатся и потери.

Теоретически изменение напряжения на токоприемнике можно учесть в ходе тяговых расчетов методом последовательных приближений.

Но этот метод трудоемкий, к тому же сам пакет КОРТЭС выдает только минимальное значение напряжения на межподстанционной зоне, при этом информация о напряжениях в других точках межподстанционной зоны отсутствует.

Для преодоления выявленной проблемы была создана математическая модель в программном пакете MATLAB Simulink на основе новых методов расчета мгновенных схем.

В данной модели тяговая нагрузка задается не током, а мощностью, при этом учитывается ограничение по максимальному току подвижной единицы. Модель также предусматривает корректировку потребляемого поездом тока таким образом, чтобы обеспечить расчетное (полученное из тягового расчета) потребление электроэнергии на тягу.

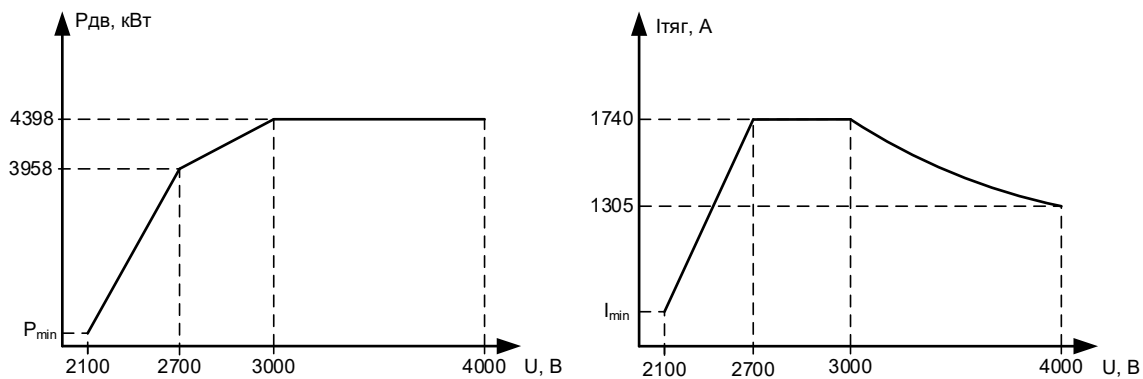


Рис. 2. Зависимость мощности и потребляемого тока электропоезда ЭС2Г от напряжения

Такая модель тяговой нагрузки наилучшим образом учитывает особенности современного электроподвижного состава [4–6]. Для восьмивагонного электропоезда ЭС2Г зависимость потребляемого на тягу тока от напряжения [4] представлена на рис. 2.

В результате ток поезда в режиме тяги:

$$I_{ii} = \begin{cases} \frac{P_{ii}}{U_i} & \text{при } U_i \geq 3000 \text{ В} \\ \min \left\{ \frac{P_{ii}}{U_i}; I_{\max} \right\} & \text{при } 2700 \leq U_i < 3000 \text{ В} \\ \min \left\{ \frac{P_{ii}}{U_i}; \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2700 - 2100} (U_i - 2100) + I_{\min} \right\} & \text{при } 2100 \leq U_i < 2700 \text{ В} \end{cases},$$

где P_{ii} — мощность поезда на i -м шаге расчета, Вт;

U_i — напряжение на токоприемнике поезда на i -м шаге расчета, В;

$I_{\max}$ — ограничение по максимальному току поезда, А;

$I_{\min}$ — максимально возможный ток поезда при напряжении 2100 В, А.

В режиме рекуперации ($P_{ii} < 0$) при напряжении выше 3850 В производится линейное ограничение тока рекуперации таким образом, что при напряжении 4000 В он становится равным нулю:

$$I_{ii} = \begin{cases} \frac{P_{ii}}{U_i} & \text{при } U_i \leq 3850 \text{ В} \\ \frac{P_{ii}}{3850} \cdot \frac{4000 - U_i}{4000 - 3850} & \text{при } 3850 < U_i \leq 4000 \text{ В} \end{cases}.$$

Очевидно, что представленные уравнения являются нелинейными. Дополнительно в модели присутствует нелинейный элемент в виде диода, который препятствует затеканию тока рекуперации обратно в тяговую подстанцию. Диод представлен кусочно-линейной моделью. А для обеспечения устойчивой сходимости решения в режимах рекуперации сопряжение между отрезками, соответствующими режиму прямой и обратной проводимости, выполнено с помощью кубического сплайна. Метод расчета

таких мгновенных схем должен строиться на базе решения нелинейных узловых уравнений тяговой сети с помощью метода Ньютона — Рафсона [7].

В настоящее время модель имеет гибридную структуру. Расстановка поездов по участкам между узлами сети (тяговыми подстанциями, линейными устройствами электроснабжения) и расчет их потребляемой мощности осуществляется программой, написанной на языке MATLAB.

Расчет мгновенных схем на каждом шаге производится с помощью программы Simulink Simscape, входящей в состав пакета MATLAB. На рис. 3 представлен вид отдельных элементов блока расчета мгновенных схем из программы Simscape.

Основным допущением, принятым в модели, является неучет снижения скорости ЭПС при работе с пониженным напряжением. Такое же допущение имеет место и в пакете КОРТЭС.

Как показывает практика, при средних напряжениях на токоприемнике не ниже 2700 В такое снижение будет незначительным. Потеря времени хода может быть компенсирована на последующих участках.

С использованием предложенной модели были смоделированы те же самые условия движения поездов, что и в пакете КОРТЭС.

В соответствии с требованиями п. 4.2.2 ГОСТ Р 57670—2017 расчеты были выполнены без учета рекуперации. Сравнению результатов расчетов с учетом рекуперации следует посвятить отдельную статью, так как предлагаемая модель позволяет определить оптимальные значения напряжений холостого хода, при которых обеспе-

чивается баланс пропускной способности и наиболее полного использования энергии рекуперации.

Результаты моделирования представлены в табл. 2. Дополнительно оценивался расход энергии каждым поездом, который определялся как сумма произведений токов и напряжений каждого поезда, а также времени шага сечения графика движения поездов, равного 0,25 минуты.

Для всех нечетных поездов он равен 1232,2 кВт·ч, для четных поездов — 1186,3 кВт·ч. Эти результаты во всех вариантах моделирования полностью совпадают с расходом энергии по результатам тяговых расчетов, представленных на рис. 1.

Таким образом, можно утверждать, что модель обеспечивает адекватный учет фактического электропотребления поезда.

Некорректный учет расхода электрической энергии связан с неправильным учетом среднего напряжения на токоприемнике электроподвижного состава.

Когда в ходе моделирования изменялись значения напряжения холостого хода на тяговых подстанциях, среднее напряжение на токоприемнике также увеличивалось, что отразилось на итоговых значениях при электрических расчетах. Однако потери электрической энергии не изменялись, так как учет потерь производится по потребляемому току, который оставался неизменным.

Использование различных поправочных коэффициентов и других методов для приведе-

Таблица 2. Результаты моделирования MATLAB

№ моделирования	1	2	3	4
Напряжение х.х. на ТП, В	3400	3500	3600	3700
Расход на тягу поездов, кВт·ч	72 556	72 556	72 556	72 556
Потери в ТС, кВт·ч	5898	5461	5046	4678
Расход на ТП, кВт·ч	78 454	78 017	77 602	77 234

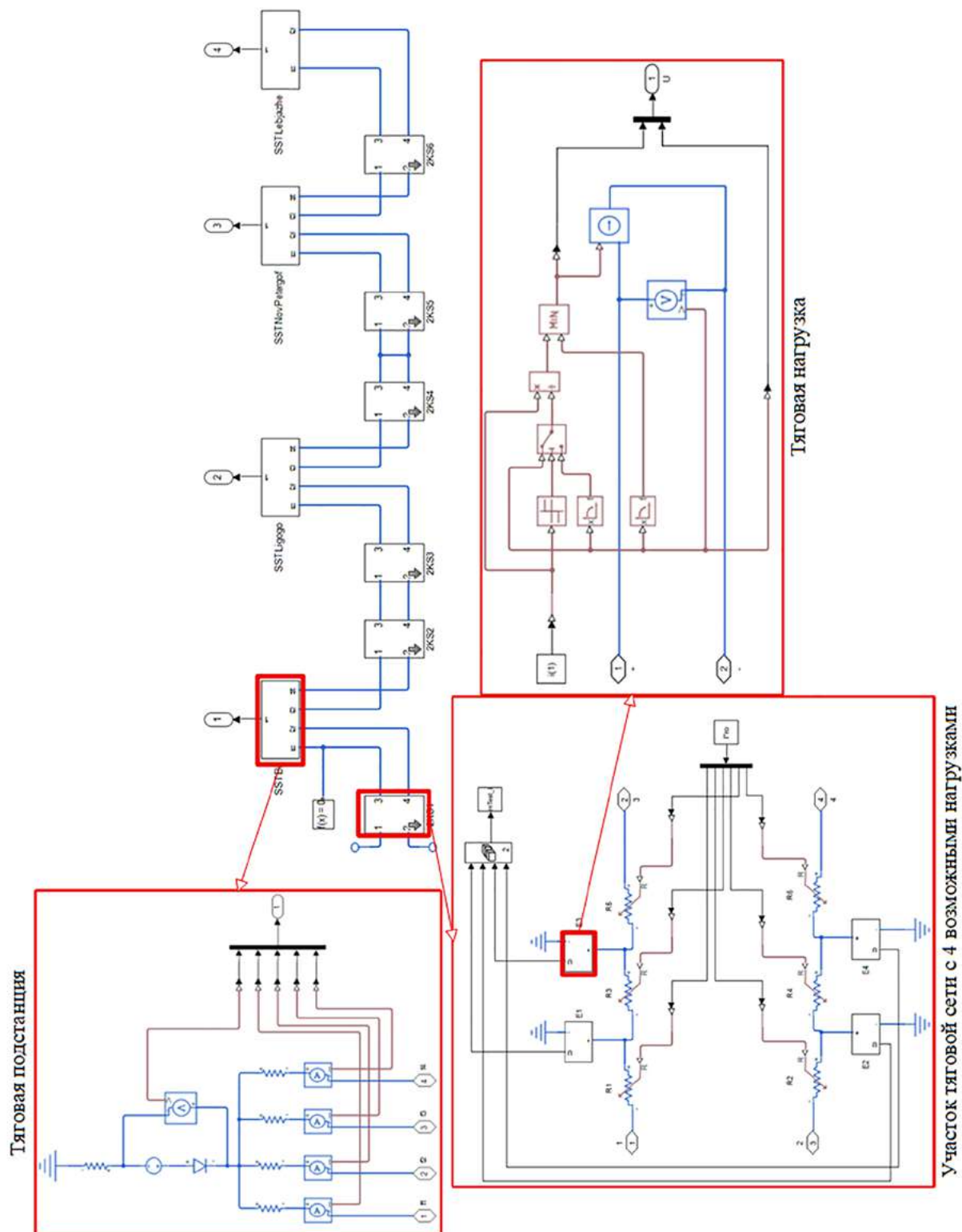


Рис. 3. Математическая модель в программном пакете MATLAB

ния результатов к реальным значениям приводит к усложнению разработки новых участков дороги, а также моделирования и тестирования принципиально новых систем.

Подобные несовершенства в расчетах связаны, как было указано ранее, с большим количеством упрощений и допущений. Среди них:

- представление всех нелинейных элементов как линейных с определенными ограничениями;
- учет рекуперации с существенным недостатком при приближении напряжения к пороговому значению;
- другие упрощения.

Подобные несовершенства существенно тормозят дальнейшее развитие высокоскоростного сообщения и увеличивают время на доработку каждого проектного решения.

В качестве решения проблемы корректного учета расхода электроэнергии и мощности подвижного состава предлагается разработать новый комплекс методов расчета мгновенных схем тягового электроснабжения.

В основу новых методов предлагается заложить ряд нововведений:

- корректное математическое представление нелинейных элементов с правильными внешними характеристиками;
- использование сплайн-интерполяции на участках сверхмалых перегибов кривых различных элементов для построения характеристик;
- нахождение решения мгновенных схем с помощью метода Ньютона — Рафсона (итерационное приближение до допустимого условия схождения расчетных параметров);
- реализация расчета мгновенных схем через матричный метод узловых потенциалов.

Заключение

В настоящей работе была продемонстрирована проблема учета расхода электрической энергии в программном пакете КОРТЭС.

В ходе исследования колебания результатов электрических расчетов средствами КОРТЭС составили около 5,9 %, а расхождения при изменении исходных параметров напряжения холостого хода превысили 6 %.

Также было проведено моделирование в программном пакете MATLAB для определения оптимальной математической модели. Полученные результаты показали полное соответствие с тяговыми расчетами, в том числе при изменении напряжения холостого хода.

В заключение была предложена разработка новых методов расчета мгновенных схем на основе:

- представления элементов моделью мощности;
- метода Ньютона — Рафсона для нахождения параметров схемы;
- сплайн-интерполяции для учета нелинейных элементов;
- матричного метода узловых потенциалов.

Разработка и подробное описание данных методов будут представлены в дальнейших работах авторов.

Список источников

1. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1983. — 328 с.
2. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. — М.: Транспорт, 1982. — 207 с.
3. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников. — Екатеринбург, 2005. — 211 с.
4. ЭС2Г. 0.00.000.000-01 РЭ7. Электropоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г исполнения «Стандарт». Руководство по эксплуатации. Часть восьмая: использование по назначению.

5. Осинцев И. А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭЭС10: учебное пособие / И. А. Осинцев, А. А. Логинов. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015. — 333 с.

6. Результаты тягово-энергетических испытаний электровоза ЭЭС8 / АО ВНИИЖТ. — М.: АО ВНИИЖТ, 2023. — 14 с.

7. Нерретер В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ: пер. с нем. / В. Нерретер. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 220 с.

Дата поступления: 16.08.2025

Решение о публикации: 22.09.2025

Контактная информация:

СУЛИМИН Артем Юрьевич — аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог»;
sulimin.artem@gmail.com

ИВАНОВ Михаил Александрович — ст. преподаватель кафедры «Электроснабжение железных дорог»;
m-a-ivanov@yandex.ru

Limitations of Calculation Models for Electricity Consumption and Traction Power for Trains Within the KORTES Software Package

A. Yu. Sulimin, M. A. Ivanov

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

For citation: Sulimin A. Yu., Ivanov M. A. Limitations of Calculation Models for Electricity and Train Traction Power Within the KORTES Software Package // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 958–966. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-958-966

Summary

Purpose: At present, there is a plethora of software packages available for the execution of a variety of tasks in the domain of railway power supply. The accurate and precise accounting of electricity and power is of paramount importance when planning the design of new roads or the reconstruction of old ones. This paper aims to identify the challenges associated with calculating electricity consumption and traction power for trains within the KORTES software package, with a view to facilitating further research and solution findings.

Methods: This study employs a modelling approach to simulate train movement and the functionality of the traction power system using the KORTES software package. This involves analyzing the data obtained and comparing the results with calculations derived from a more sophisticated mathematical model built in the MATLAB-Simulink package. **Results:** This study has identified the principal challenges associated with calculating the power supply consumption and traction power in trains. A notable deficiency has been identified, namely the oversight of consideration of the voltage at the current collector. Through simulation conducted using the KORTES software package for electricity and traction calculations with varying initial parameters, inconsistencies in the mathematical models of the software package under investigation have been uncovered. The paper also introduces potential solutions for addressing the issues stated above. **Practical significance:** The findings of this study are of significance for future research in the domain of traction power supply system calculations, enhancing mathematical models to boost the efficiency, safety, and cost-effectiveness of designed solutions, as well as paving the way for new research ideas facilitated by accurate calculation and simulation tools.

Keywords: Software package, electricity consumption calculation, calculation issues, mathematical model limitations, software package enhancement, calculation method development.

References

1. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Theory of electric traction: textbook for railway transport universities]. Moscow: Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian)
2. Mirosnichenko R. I. *Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov* [Operating modes of electrified sections]. Moscow: Transport Publ., 1982, 207 p. (In Russian)
3. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyaemogo elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka* [System of controlled power supply for electrified DC railways]. Ekaterinburg, 2005, 211 p. (In Russian)
4. ES2G. 0.00.000.000-01 RE7. *Elektropoezd s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G ispolneniya "Standart". Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' vos'maya: ispol'zovanie po naznacheniyu* [ES2G electric train with asynchronous traction drive of the EGE series ES2G "Standard" version. Operating manual. Part eight: intended use]. (In Russian)
5. Osintsev I. A., Loginov A. A. *Ustroystvo i ekspluatatsiya elektrovoza 2ES10: uchebnoe posobie* [Design and operation of electric locomotive 2ES10: textbook]. Moscow: OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi" Publ., 2015, 333 p. (In Russian)
6. *Rezul'taty tyagovo-energeticheskikh ispytaniy elektrovoza 3ES8* [Results of traction and energy tests of electric locomotive 3ES8]. Moscow: AO VNIIZhT Publ., 2023, 14 p. (In Russian)
7. Nerreter V. *Raschet elektricheskikh tsepey na personal'noy EVM: per. s nem.* [Calculation of electrical circuits on a personal computer: transl. from German]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991, 220 p. (In Russian)

Received: August 16, 2025

Accepted: September 22, 2025

Author's information:

Artyom Yu. SULIMIN — Postgraduate Student of the Department "Electrical Power Supply of Railways";
sulimin.artem@gmail.com

Mikhail A. IVANOV — Senior Lecturer of the Department "Electrical Power Supply of Railways";
m-a-ivanov@yandex.ru

УДК 629.423.31

Диагностика изоляции тяговых электродвигателей по интенсивности частичных разрядов

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Диагностика изоляции тяговых электродвигателей по интенсивности частичных разрядов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 967–974. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-967-974

Аннотация

Цель: Мониторинг состояния, включающий диагностику и прогнозирование неисправностей тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов, давно привлекает внимание исследователей. Фактически правильная диагностика и раннее обнаружение зарождающихся неисправностей приводят к быстрому обслуживанию и короткому простоя локомотива в сервисном депо. В статье рассматривается возможность применения диагностики изоляции ТЭД за счет анализа интенсивности частичных разрядов.

Методы: В последние годы было проведено значительное количество исследований по созданию новых методов мониторинга состояния ТЭД, устраняющих недостатки традиционных методов диагностики технического состояния. В частности, происходит переход от методов планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому техническому состоянию. При реализации этого подхода роль технической диагностики значительно возрастает. В статье выполнен анализ полученных экспериментальных данных по изменению интенсивности частичных разрядов при диагностировании состояния изоляции ТЭД. **Результаты:** Идеальная процедура диагностики должна включать минимальный набор измерений, необходимых для оценки состояния машины. На основе анализа этих данных следует формировать диагноз, позволяющий: сделать вывод о текущем состоянии оборудования; своевременно выявить зарождающиеся режимы отказа за минимально возможное время. В результате проведенных исследований установлено, что токи частичного разряда отсутствуют ниже определенного начального напряжения. При этом некоторая степень нелинейности градации нагрузки может наблюдаться даже при значениях напряжения ниже данного порога. **Практическая значимость:** Снижение затрат на техническое обслуживание и предотвращение незапланированных простоев локомотивов является приоритетным направлением работы изготовителей и эксплуатационников. Использование современных систем мониторинга и диагностики ТЭД позволяет выработать рациональные предложения по совершенствованию конструкции электрических машин локомотивов, а также повышению их надежности в эксплуатации.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель, изоляция, частичные разряды, надежность электрических машин, диагностика тяговых электродвигателей.

Введение

Обнаружение дефектов в работающем тяговом электродвигателе (ТЭД) на ранней стадии их развития не только предупредит внезапную остановку локомотива в результате аварии, но и значительно снижает расходы на ремонт и увеличивает срок его службы. Кроме этого, в настоящее время достаточно актуально применение адаптивных устройств защиты и диагностики, позво-

ляющих выполнять диагностику ТЭД независимо от их мощности и конструкции. Диагностика ТЭД должна проводиться неразрушающими методами контроля, однозначно связанными с физико-механическими свойствами его компонентов, что исключает нанесение вреда оборудованию.

Многие типы диагностических измерений широко используются для оценки технического состояния изоляции ТЭД, однако сложность ее

конструкции, а также процессов старения и разрушения делает каждый метод просто дополнительным индикатором ее состояния. К сожалению, в настоящее время нет инструмента, который надежно предупреждал бы о точном моменте наступления отказа. Также отсутствуют средства, позволяющие точно прогнозировать, как долго изоляция будет выдерживать заданные напряжения и нагрузки без разрушения.

Системы изоляции ТЭД подвергаются многочисленным испытаниям и диагностическим измерениям при проектировании и изготовлении, перед поставкой, при установке и в течение всего срока службы. Результаты используются для проверки пригодности изоляции, оптимизации планирования эксплуатации и технического обслуживания ТЭД или обнаружения предполагаемого дефекта. Методы диагностики могут быть улучшены за счет любой комбинации следующих факторов: повышения вероятности выявления важной проблемы, снижения вероятности ее пропуска, сокращения времени измерений или уменьшения капитальных затрат на используемое оборудование.

Проблемы диагностики, прогнозирования и принятия решений сложны для изучения. Реальные условия эксплуатации ТЭД различаются, отказы нельзя надежно предсказать на основе моделей процессов старения и износа. Ускоренные испытания изоляции являются лишь аппроксимацией эффектов в процессе эксплуатации, а хорошие данные о сроке ее службы для реального старения к естественному отказу трудно получить. Хорошая система для диагностических или прогностических результатов не просто выберет какие-то правила и оставит их, но воспользуется опытом, полученным во время ее использования, чтобы рассмотреть возможность корректировки этих правил.

1. Исследование частичных разрядов

Полное описание физического явления ионных разрядов в газовой среде, хотя и представ-

ляет научный интерес, выходит за рамки данной работы. Основное внимание здесь уделяется эффектам старения изоляции, поддающимся измерению или оценке. Возникновение частичных разрядов в воздушном кармане изоляции между двумя проводниками обусловлено электрическим полем, замыкающимся через дефект. Это поле усиливается геометрией самого дефекта и наличием заряженных частиц [1, 2].

Частичные разряды не являются обязательным критерием оценки качества изоляционного материала ТЭД тепловозов при приемочных испытаниях [3], однако они имеют большое значение для контроля изоляции в течение всего срока ее службы. При приемочных испытаниях возможны небольшие частичные разряды, что не обязательно свидетельствует о неудовлетворительном состоянии изоляционного материала.

Частичный разряд — это кратковременный разряд малой мощности в виде искры, замыкающей лишь часть промежутка между изоляцией и проводником или корпусом [4, 5]. Он возникает в полостях и на поверхностях изоляции обмоток, а также в изоляции лобовых частей. Поскольку это кратковременное явление, частичный разряд не приводит к немедленному выходу из строя ТЭД и не повреждает материал изоляции (см. рис. 1).

Необходимо фиксировать количество частичных разрядов внутри машины и анализировать их. Рост активности разрядов со временем (увеличение числа импульсов и их амплитуды) свидетельствует о старении изоляции обмотки. Это позволяет заблаговременно оценить степень ухудшения ее состояния — задолго до катастрофического внезапного отказа. При этом сбор данных возможен без прерывания работы электрической машины [6].

В дополнение к испытаниям на старение были выполнены измерения частичных разрядов, чтобы связать полученные данные и сформировать четкое представление об активности частичных разрядов в изоляции ТЭД [7, 8].

Установка для регистрации частичных разрядов включает:

- испытательный комплект;
- высоковольтный источник переменного тока 0–20 кВ (Trek 20/20);
- детектор частичных разрядов (IDAX 300).

Уровень шума в лаборатории при измерениях составлял менее 3 пКл (рис. 2). В режиме осциллографа для дальнейшего анализа записывались синусоидальные зависимости питающего напряжения и активности частичных разрядов [9].

Для регистрации частичных разрядов в материале изоляции сначала подавали испытательное переменное напряжение 1 кВ частотой 60 Гц на обмотку, при этом зубцовая зона была заземлена.

Выбор синусоидальной формы для стареющих систем изоляции был обоснован тем, что довольно сложно аналитически воспроизвести электрическое ограничение, вызванное быстродействующими преобразователями, поскольку процесс включает переменные времена нарастания и значения dU/dt , перенапряжения, рабочие циклы и изменения полярности. Более того, синусоидальная форма напряжения позволяет учесть, что влияние стационарных частичных разрядов на высокой частоте смягчается из-за их меньшего количества. В результате старение при синусоидальном или прямоугольном напряжении дает одинаковые результаты для заданных величины напряжения и частоты [2].

Синусоидальное напряжение удобно не только для расчета размеров экспериментальной установки, но и для интерпретации и экстраполяции

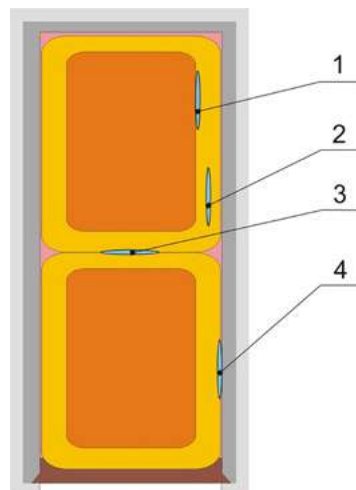


Рис. 1. Места возможного возникновения частичных разрядов:

- 1 — граница «проводник — изоляция»;
 2 — внутри изоляции; 3 — граница секций;
 4 — граница «изоляция — сердечник»

результатов, полученных на высокой частоте, на любые другие частоты. Однако требуются дополнительные исследования, чтобы глубже понять срок службы изоляционных систем — в частности, особенности старения под действием прямоугольного напряжения на низкой частоте. Также необходимо оценить, можно ли распространить полученные результаты на другие электрические машины.

Когда используется синусоидальное переменное напряжение, обнаруженные импульсы частичных разрядов могут быть обработаны с помощью анализа с фазовым разрешением, а установленная связь между шаблоном с фазовым разрешением и конкретным типом частичного разряда может быть использована для выявления слабости системы изоляции образца. Если, напротив, переменное напряжение пода-

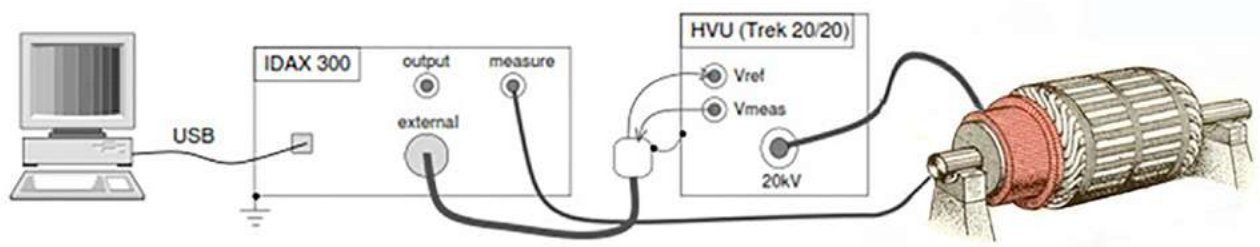


Рис. 2. Экспериментальная платформа для обнаружения частичных разрядов

ется непосредственно на образец обмотки, полученная информация очень ограничена, даже если регистрируются импульсы частичных разрядов. Без знания типа произошедших частичных разрядов будет сложно провести теоретический и статистический анализ собранных импульсов частичных разрядов [10].

Основная цель испытания частичных разрядов — подтвердить, что в системе изоляции отсутствуют какие-либо действия частичных разрядов при данном уровне испытательного напряжения. Случаи частичного разряда имеют тенденцию исчезать ниже определенной величины напряжения, это будет означать, что системы изоляции не подвержены или почти не подвержены частичным разрядам [2]. В связи с этим возникают вопросы о необходимости проведения испытаний на старение в присутствии частичных разрядов.

На рис. 3 представлены результаты регистрации частичных разрядов в изоляции опытного образца — в исходном состоянии и после 500 термоциклов нагружения (N_i — количество термоциклов) при напряжении питания 1 кВ.

Из рис. 3 видно, что результаты измерения частичных разрядов (красная линия) отличаются от типичных зарегистрированных изображений. Типичные картины частичного разряда, наблюдаемые в большинстве машин, происходят в четко определенных диапазонах частот в первом и третьем квадрантах синусоидальной волны напряжения питания частотой 60 Гц (зеленая линия). Качество получаемых данных не очень хорошее, они скорее напоминают внешний шум, поэтому отличить шумовые импульсы от импульсов частичных разрядов сложно [11].

Внешние помехи, вероятно, будут иметь тот же частотный спектр, что и эти частичные разряды. Это связано с тем, что блок формирования сигнала отфильтровывает все внешние помехи за пределами полосы пропускания 30–300 кГц. Из спектра принятого сигнала можно сделать вывод, что шум может быть вызван статическим преобразователем мощности, подключенным к той же линии электропередачи. На самом деле испытательного напряжения в 1 кВ недостаточно, чтобы вызвать устойчивый частичный разряд в материале изоляции ТЭД.

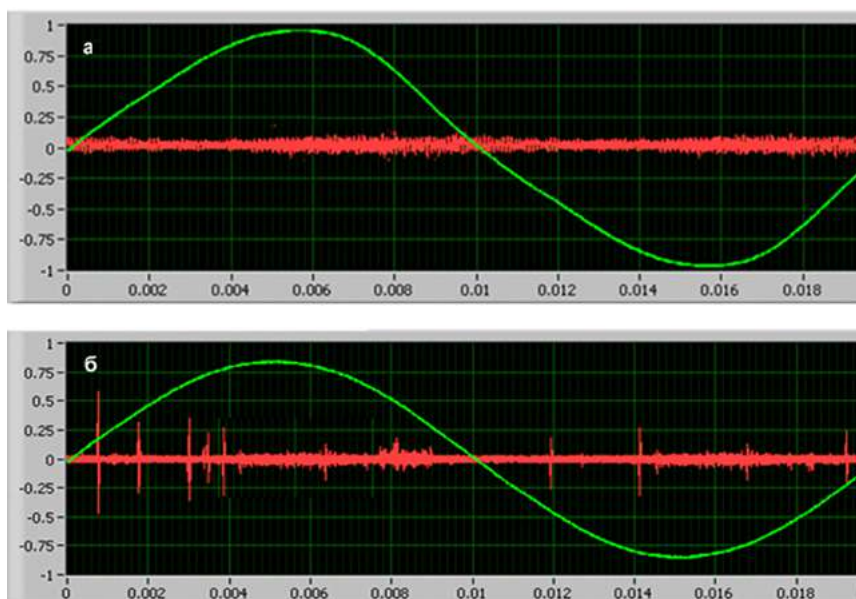


Рис. 3. Осциллограммы регистрации частичного разряда при 1,0 кВ:

a — $N_i = 0$; $б$ — $N_i = 500$

На рис. 4 приведена осциллограмма типового процесса регистрации частичных разрядов без фильтрации в изоляции опытного образца при напряжении питания 5 кВ частотой 60 Гц переменного тока в исходном состоянии и после 500 термоциклов нагружения.

Данные частичных разрядов в обмотке, полученные в этом случае, имеют значительное сходство с типичной картиной разряда, характерной для большинства вращающихся электрических машин [6]. Наблюдаются незначительные различия в формах сигналов, полученных в обоих случаях. Основная причина заключается в том, что они относятся к разным циклам.

На рис. 4 источники частичных разрядов при визуальном осмотре имеют относительно малую величину мощности и охватывают большую площадь с относительно стабильными величинами. Некоторые импульсы частичного разряда имеют относительно большую амплитуду. Эти большие частичные разряды имеют тенденцию возникать в узком окне анализа с фазовым разрешением перед положительным пиком, а также перед отрицательным пиком напряжения питания.

Визуальный анализ данных о частичных разрядах остается наиболее распространенным методом мониторинга состояния изоляции высоковольтных электродвигателей. Однако для полноценной интерпретации информационного содержания таких сигналов требуются значительные опыт и знания. При этом визуальный анализ частичных разрядов не может считаться надежным индикатором состояния изоляции электродвигателей с напряжением питания менее 1 кВ [6].

Традиционные методы калибровки частичных разрядов неприменимы к ТЭД тепловозов, поскольку их уровень измеряется не в месте фактического возникновения, а на клеммах обмотки. Обмотки каждого ТЭД отличаются и по-разному влияют на импульсы частичного разряда — особенно когда они возникают в спрятанной в пазах части обмотки.

Место возникновения частичных разрядов напрямую влияет на величину сигнала, регистрируемого на клеммах электрической машины. Импульс частичного разряда затухает при прохождении через обмотку. Поэтому частичный разряд с меньшей амплитудой может отобра-



Рис. 4. Осциллограммы регистрации частичного разряда при 5,0 кВ:
а — $N_i = 0$; б — $N_i = 500$

жаться на клеммах сильнее, чем более мощный, но расположенный дальше от точки регистрации — и наоборот.

Промышленный опыт показывает: некоторые электрические машины демонстрируют значительные уровни частичных разрядов, которые остаются стабильными в течение длительного времени и могут сохраняться годами без ущерба для изоляции. В то же время другие машины показывают небольшие значения частичных разрядов, постепенно увеличивающиеся со временем — это сигнализирует о наличии механизма отказа, влияющего на изоляцию [5].

Следовательно, для каждой электрической машины требуется индивидуальная калибровка: подается импульс известной амплитуды и измеряется энергия частичного разряда. Отсюда следует, что анализ, основанный исключительно на величине частичных разрядов, не может считаться надежным для оценки состояния изоляции ТЭД.

Анализ полученных при экспериментальных исследованиях данных показал, что характер изменения частичных разрядов при диагностировании изоляции ТЭД нельзя использовать как основной показатель ее состояния из-за низкого рабочего напряжения. Использование более высоких испытательных напряжений может привести к электрическому повреждению изоляции ТЭД. Поэтому наличие частичного разряда можно использовать лишь как дополнительное подтверждение заключения о техническом состоянии его изоляции.

Выводы

В ходе исследований установлено: токи частичного разряда отсутствуют ниже определенного начального напряжения. При этом некоторая степень нелинейности градации нагрузки может наблюдаться и при более низких значениях.

Возможность возникновения частичного разряда в конце градации напряжения при низ-

ких частотах и рабочих напряжениях, вероятно, не имеет практического значения как признак повреждения изоляции ТЭД. В экспериментах на модельных образцах при частоте 60 Гц такие разряды не зафиксированы.

Список источников

1. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г. С. Кучинский. — Л.: Энергия, 1979. — 224 с.
2. Montanari G. C. Accelerated aging, partial discharges and breakdown of Type II turn-to-turn insulation system of rotating machines / G. C. Montanari, A. Cavallini, F. Ciani, A. Contin // IEEE Electrical Insulation Conference. — Jun. 2016. — Pp. 190–193.
3. ГОСТ 2582—2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 5 ноября 2013 г. № 61-П. — Введен в действие с 1 января 2015 г. — Официальное издание. — М.: Издательство стандартов, 2014. — 67 с.
4. Поляков Д. А. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи / Д. А. Поляков, Н. А. Терещенко, И. В. Комаров, К. И. Никитин и др. // Омский научный вестник. — 2020. — № 6(174). — С. 63–68.
5. Candela R. Diagnosis of HV capacitive insulators by partial discharge measurements / R. Candela, R. Schifani // IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — 2001. — Kitchener, Ontario, Canada. — Pp. 365–368.
6. Abadie C. Partial discharges in motor fed by inverter: from detection to winding configuration / C. Abadie, T. Billard, T. Lebey // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2018. — Pp. 1–10.
7. ГОСТ 20074—83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15 апреля 1983 г. № 1961. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 22 с.
8. ГОСТ IEC/TS 60034-27-2—2015. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки включенных в сеть вращающихся электрических машин / Принят Межгосударственным советом по стан-

дартизации, метрологии и сертификации 29 ноября 2015 г. № 80-П. — Москва: Стандартинформ, 2016. — 49 с.

9. Руссов В. А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В. А. Руссов. — М.: Энергия, 2011. — 370 с.

10. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовико. — Новосибирск: Наука, 2007. — 155 с.

11. Галушко А. И. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галушко, И. С. Максимова,

Р. Г. Оснач, П. М. Хазановский. — М.: Энергия, 1979. — 175 с.

Дата поступления: 11.10.2025

Решение о публикации: 14.11.2025

Контактная информация:

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

Diagnostics of Traction Motor Insulation by Partial Discharge Measuring Method

M. A. Shrayber

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

For citation: Shrayber M. A. Diagnostics of Traction Motors Insulation by Partial Discharge Measurement // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 967–974. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-967-974

Summary

Purpose: Monitoring the condition of traction electric motors (TEM) in locomotives involves diagnosing and predicting malfunctions. This has been a subject of a great amount of research. Accurate diagnoses and early detection of potential issues lead to timely maintenance and reduce downtime of locomotives at depots. This paper explores the use of TEM insulation diagnostics by analyzing partial discharge intensity. **Methods:** In recent years, a significant amount of research has been conducted to create new methods for monitoring the condition of TEM, addressing the shortcomings of traditional diagnostic techniques. Specifically, there is a shift from scheduled preventive maintenance to maintenance based on the actual operating condition of the equipment. The implementation of this approach significantly enhances the role of technical diagnostics. This paper presents an analysis of the experimental data obtained regarding changes in the partial discharge intensity during the diagnosis of the TEM insulation condition. **Results:** An ideal diagnostic procedure should include the essential measurements required to assess the condition of the machine. Based on the analysis of the data obtained, a diagnosis should be formed that enables an evaluation of the current state of the equipment, the timely identification of emerging failure modes in the shortest possible time. The research has shown that partial discharge currents are absent below a specific initial voltage. However, a certain degree of nonlinearity in the load gradation may still be observed even at voltage levels below this value. **Practical significance:** Reducing maintenance costs and preventing unplanned downtime of locomotives is a priority for manufacturers and operators. The implementation of advanced monitoring and diagnostics systems for traction electric motors will enable the development of rational proposals for improving the design of electric locomotives and enhancing their reliability during operation.

Keywords: Traction electric motor, insulation, partial discharges, reliability of electric machines, diagnostics of traction electric motors.

References

1. Kuchinskiy G. S. *Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruktseyakh* [Partial discharges in high-voltage structures]. Leningrad: Energiya Publ., 1979, 224 p. (In Russian)
2. Montanari G. C., Cavallini A., Ciani F., Contin A. Accelerated aging, partial discharges and breakdown of Type II turn-to-turn insulation system of rotating machines. IEEE Electrical Insulation Conference, Jun. 2016, pp. 190–193.
3. GOST 2582—2013. *Mashiny elektricheskies vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Prinyat Mezhdgosudarstvennym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii 5 noyabrya 2013 g. № 61-P. Vveden v deystvie s 1 yanvarya 2015 g. Ofitsial'noe izdanie* [Rotating electric traction machines. General technical conditions. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification on November 5, 2013, No. 61-P. Effective since January 1, 2015. Official publication]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2014, 67 p. (In Russian)
4. Polyakov D. A., Tereshchenko N. A., Komarov I. V., Nikitin K. I. et al. Issledovanie kharakteristik chastichnykh razryadov v iskusstvennykh defektakh liniy elektroperedachi [Investigation of partial discharge characteristics in artificial defects of power transmission lines]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2020, Iss. 6(174), pp. 63–68. (In Russian)
5. Candela R., Schifani R. Diagnosis of HV capacitive insulators by partial discharge measurements. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, Kitchener, Ontario, Canada, pp. 365–368.
6. Abadie C., Billard T., Lebey T. Partial discharges in motor fed by inverter: from detection to winding configuration. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, pp. 1–10.
7. GOST 20074—83. *Elektrooborudovanie i elektroustanovki. Metod izmereniya kharakteristik chastichnykh razryadov. Utverzhden i vveden v deystvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 15 aprelya 1983 g. № 1961* [Electrical equipment and installations. Method for measuring partial discharge characteristics. Approved and put into effect by Resolution of the USSR State Standards Committee of April 15, 1983, No. 1961]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1983, 22 p. (In Russian)
8. GOST IEC/TS 60034-27-2—2015. *Izmereniya chastichnogo razryada na izolyatsii statornoy obmotki vklyuchennykh v set' vrashchayushchikhsya elektricheskikh mashin. Prinyat Mezhdgosudarstvennym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii 29 noyabrya 2015 g. № 80-P* [Measurements of partial discharge on the insulation of the stator winding of energized rotating electrical machines. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification on November 29, 2015, No. 80-P]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 49 p. (In Russian)
9. Russov V. A. *Izmerenie chastichnykh razryadov v izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Measurement of partial discharges in the insulation of high-voltage equipment]. Moscow: Energiya Publ., 2011, 370 p. (In Russian)
10. Vdoviko V. P. *Chastichnye razryady v diagnostirovani vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Partial discharges in diagnostics of high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2007, 155 p. (In Russian)
11. Galushko A. I., Maksimova I. S., Osnach R. G., Khazanovskiy P. M. *Nadezhnost' izolyatsii elektricheskikh mashin* [Reliability of electrical machine insulation]. Moscow: Energiya Publ., 1979, 175 p. (In Russian)

Received: October 11, 2025

Accepted: November 14, 2025

Author's information:

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

УДК 625.171:625.143.482

Анализ факторов, влияющих на точность результатов метода определения температурных напряжений плетей бесстыкового пути при помощи частот собственных колебаний

Б. И. Ходак, В. П. Бельтюков

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

Для цитирования: Ходак Б. И., Бельтюков В. П. Анализ факторов, влияющих на точность результатов метода определения температурных напряжений плетей бесстыкового пути при помощи частот собственных колебаний // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 975–983. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-975-983

Аннотация

Цель: Исследование факторов, оказывающих существенное влияние на точность определения температурных напряжений в плетях бесстыкового железнодорожного пути при использовании метода анализа частот собственных колебаний. Совершенствование метода определения температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути при помощи частот форм собственных колебаний рельсов. **Методы:** В работе проведен анализ математической модели, определяющей частоту собственных колебаний рельсов. Исследована степень погрешности измерения частоты колебаний, обусловленная усилием воздействия на рельс и расположением датчиков, регистрирующих частоты собственных колебаний. Для оценки вклада каждого фактора были использованы методы математического моделирования и численные методы анализа. **Результаты:** Выявлены факторы, вносящие вклад в погрешность определения температурных напряжений. Определены факторы, влияющие на точность результатов измерения частот форм собственных колебаний. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволят разработать более точные и надежные методы мониторинга температурных напряжений в бесстыковом пути, а также могут быть использованы для совершенствования метода определения частот форм собственных колебаний для диагностики температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути.

Ключевые слова: Путевое хозяйство, железнодорожный путь, бесстыковой путь, температурно-напряженное состояние, контроль напряжений.

Введение

Бесстыковой путь является ответственной конструкцией, нарушение регламента его эксплуатации влияет на безопасность движения поездов. При несоблюдении температурного режима содержания бесстыкового пути могут произойти такие нарушения, как выброс пути при повышенных температурах или разрыв рельсовой нити при пониженных температурах, что может послужить причиной схода подвижного состава и привести к значительным затратам на ликвидацию

последствий. Для предотвращения этих явлений бесстыковой путь должен закрепляться при определенных температурах рельсов.

В процессе эксплуатации в плетях бесстыкового пути напряжения могут изменяться в силу различных факторов, таких как угон пути, производство путевых работ и по другим причинам. Поэтому важно знать не только температуру плети при укладке, но и температуру, при которой в плети отсутствуют температурные напряжения. Эта температура на большинстве дорог

мира называется «нейтральная температура», а в нормативной документации ОАО «РЖД» — «фактическая температура закрепления». Для ее определения надо знать фактические напряжения в рельсовых плетях.

Инструкцией [1] предусмотрены следующие меры контроля температурного режима работы бесстыкового пути: фиксация температур закрепления плети при их укладке в путь или фиксация расчетной величины температуры закрепления при вводе плетей в температурный режим принудительным методом (нагревом, натяжением), контроль сдвига плетей на маячных шпалах или створах, контроль за усилием прижатия рельсов к основанию, визуальный контроль наличия угона по внешним признакам.

Также в ОАО «РЖД» используется комплексный анализ предотказного состояния бесстыкового пути, в ходе которого определяется вероятность выброса пути на основании косвенных признаков.

С точки зрения оперативного контроля наибольший интерес представляет измерение температурных напряжений в плети, так как они могут вызвать выброс пути при превышении допустимых значений.

Напряжения в рельсовых плетях определяются по формуле:

$$\sigma = \alpha E (t_n - t_p), \quad (1)$$

где α — коэффициент расширения рельсовой стали;

E — модуль упругости рельсовой стали;

t_p — температура рельса в момент измерений;

t_n — нейтральная температура рельса, при которой температурные напряжения в рельсе равны нулю.

Зная напряжения в рельсах, нейтральную температуру можно вывести из формулы (1):

$$t_n = t_p + \frac{\sigma_t}{\alpha E}, \quad (2)$$

где σ_t — температурные напряжения в рельсе.

Существуют следующие методы оценки напряжений [2–6] по различным параметрам: рентгеновский метод, магнитоупругий метод, поляризационно-оптический метод, метод хрупких покрытий, электромагнитные и другие методы. Все они не получили широкого применения ввиду существенных недостатков, следовательно, до сих пор существует необходимость исследований с целью разработки нового метода определения напряжений, который будет отвечать современным требованиям, иметь низкую стоимость в эксплуатации и обладать высокой точностью результатов.

Для определения температурных напряжений предлагается использовать метод определения частот форм собственных колебаний упругих объектов, при этом в качестве упругого объекта принимается рельс.

Физический смысл форм колебаний заключается в том, что любая система может совершать свободные колебания только определенными способами, которые зависят от ее физических свойств, в том числе от механических напряжений [7–9]. При возбуждении системы (например, ударе или толчке) она начинает колебаться в соответствии с этими естественными формами с определенной частотой.

Суть метода состоит в том, что на рельс подается звуковой сигнал переменной частоты с постоянной амплитудой. Так как собственные частоты форм колебаний менее подвержены затуханию, то после прохождения звуковой волны через рельс они будут иметь более высокую амплитуду. Прошедшая через рельс звуковая волна записывается и анализируется, по результатам анализа выделяются точные частоты форм колебаний рельса.

Для практического решения задачи определения фактических температурных напряжений в рельсе необходимо изучить факторы, влияющие на точность измерений частот собственных колебаний рельса.

В ходе исследования рассмотрены следующие аспекты:

- влияние амплитуды звукового сигнала, который подается на рельс;
- влияние взаимного расположения источника звукового сигнала и датчика, фиксирующего пропущенную через рельс звуковую волну.

Результаты анализа позволят разработать рекомендации по оптимизации метода контроля температурных напряжений. Для проведения исследования были проведены моделирование и экспериментальная проверка модели.

Описание методики исследования

Для исследования степени влияния процесса измерения на точность результатов был произведен ряд экспериментов с рельсом температурного стенда (рис. 1). Стенд состоит из двух железобетонных шпал с плотно зафиксированными на них рельсами длиной 2 м.

В процессе измерений на рельс температурного стенда устанавливаются вибродинамик и пьезозвукосниматель (рис. 2) [10].

При помощи вибродинамика на рельс подается звуковой сигнал переменной частоты с постоянной амплитудой; прошедшая через рельс звуковая волна записывается при помощи пьезозвукоснимателя. Полученная запись анализируется в блоке обработки информации с применением преобразования Фурье. В результате выводится функция зависимости громкости (амплитуды) (dB) по оси Y от частоты сигнала (Hz) по оси X . Пример результата вычислений представлен на рис. 3: график отображает исходный сигнал, записанный напрямую с вибродинамика без прохождения через рельс при помощи пьезозвукос-

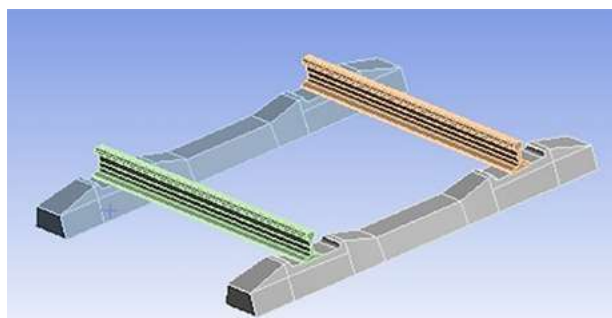


Рис. 1. Модель температурного стенда

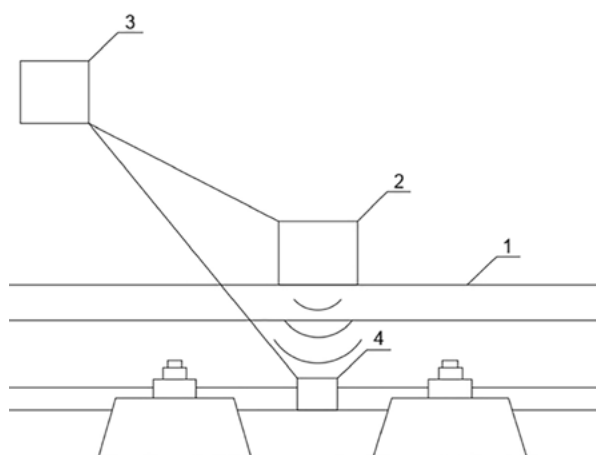


Рис. 2. Схема закрепления оборудования на рельсе температурного стенда:
1 — рельсовая плеть; 2 — вибродинамик;
3 — блок обработки информации;
4 — пьезозвукосниматель

нимателя, с целью проверки точности оборудования и анализа искажений воспроизводимого сигнала.

Физический смысл отрицательных децибел на графике заключается в том, что значения меньше 0 дБ показывают, насколько текущий уровень громкости сигнала ниже максимального. Так как полученный график представляет из себя горизонтальную линию с незначительными отклонениями, можно сделать вывод о том, что исходный сигнал воспроизводится вибродинамиком практически без искажений.

Для проверки результатов натурных исследований и подтверждения корректной работы устройства был произведен расчет частот форм

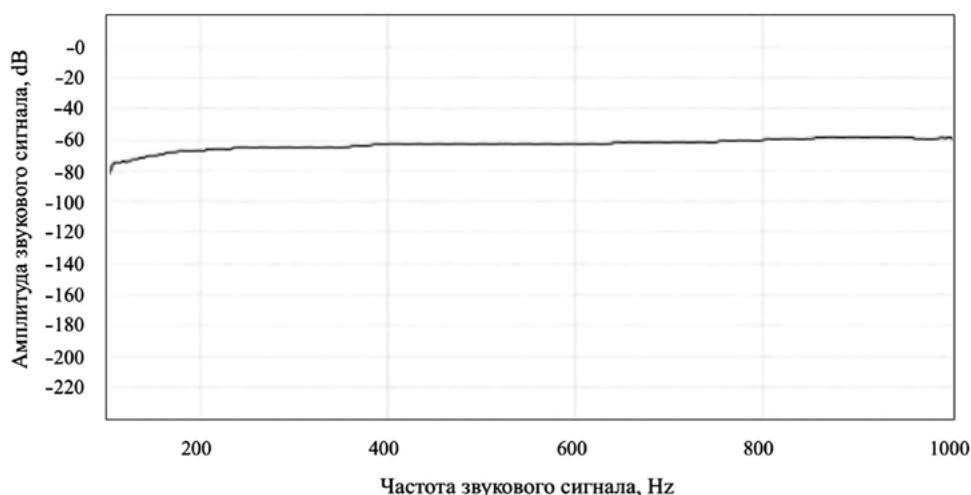


Рис. 3. Результаты записи исходного сигнала, подаваемого с вибродинамика на пьезозвукосниматель

Таблица 1. Результаты программного расчета частот форм собственных колебаний рельсов температурного стенда

№ формы колебаний	Частота формы колебаний, Hz
1	159,17
2	288,23
3	301,5
4	353,86
5	554,51

Таблица 2. Значения частот форм собственных колебаний, полученных при помощи вибродинамика и звукоснимателя

№ формы колебаний	Частота формы колебаний, Hz
1	158,97
2	282,31
3	Значение не определено, так как спектр собственных частот в этом интервале не имеет четко выраженного пика
4	
5	

собственных колебаний рельсов температурного стенда в программном комплексе ANSYS, его результаты представлены в табл. 1.

Натурные эксперименты

Целью экспериментов является установление степени влияния различных факторов на точность результатов измерений.

На первом этапе для проверки точности измерений был проведен эксперимент с рельсами температурного стенда, описанный ранее, результаты представлены на рис. 4 и в табл. 2.

Так как при моделировании и расчете в программном комплексе устанавливаются идеальные условия, расчетные значения и значения, полученные при помощи натурных измерений, могут различаться. Также по графику не представляется возможным определение третьей, четвертой и пятой форм коле-

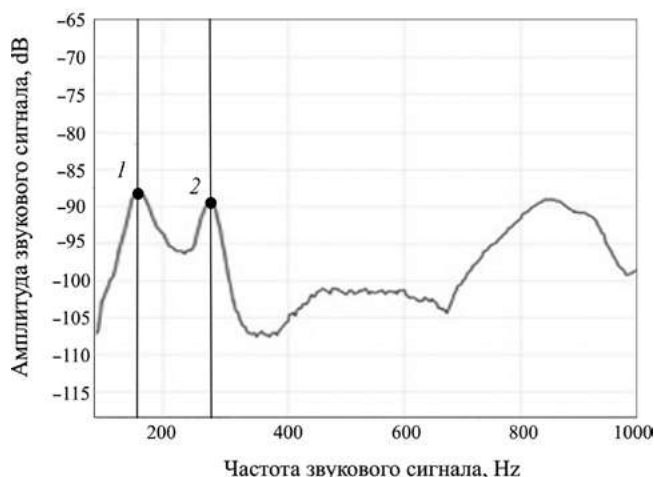


Рис. 4. Запись частот форм собственных колебаний, полученных при помощи вибродинамика и звукоснимателя:
1 — 1-я форма колебаний 159,87 Hz;
2 — 2-я форма колебаний 282,31 Hz

баний, поэтому в дальнейшем будут исследоваться только первая и вторая формы колебаний рельса.

Для проверки адекватности полученных данных совместно с записью частот собственных колебаний при помощи устройства была произведена запись единичного воздействия на рельс ударом. С физической точки зрения во время удара происходит воздействие на рельс всем спектром частот, более длительное время затухания будут иметь резонансные частоты, совпадающие с частотами собственных колебаний рельса, следовательно, таким образом возможно проверить подлинность значений, полученных при помощи разработанного устройства. Результаты эксперимента представлены на рис. 5 и в табл. 3.

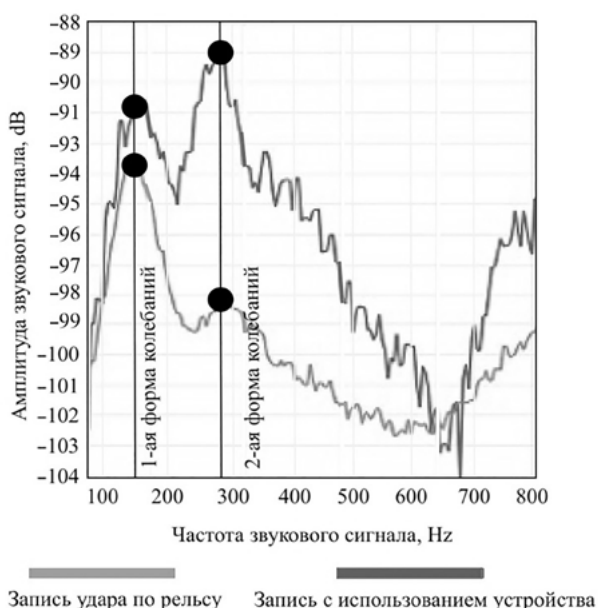


Рис. 5. Запись удара по рельсу и запись частот, полученных при помощи устройства

Таблица 3. Значения частот форм собственных колебаний, полученных в результате удара по рельсу, и запись частот, полученных при помощи устройства

№ формы колебаний	Частота формы колебаний, полученная при помощи устройства, Hz	Частота формы колебаний, полученная при помощи записи удара по рельсу, Hz
1	158,97	158,67
2	282,31	283,23

Поскольку результаты, полученные с помощью разработанного устройства, минимально расходятся с данными, зафиксированными при записи затухающих колебаний рельсов температурного стенда, можно заключить, что способ определения частот собственных форм колебаний обладает достаточно высокой точностью и позволяет определять частоты собственных колебаний рельса.

На следующем этапе измерений был произведен замер различных уровней громкости сигнала, подаваемого с динамика на рельс, результаты представлены на рис. 6 и в табл. 4.

По результатам анализа частот форм собственных колебаний, полученных в ходе эксперимента, можно сделать вывод о том, что громкость исходного сигнала не влияет на результат измерения.

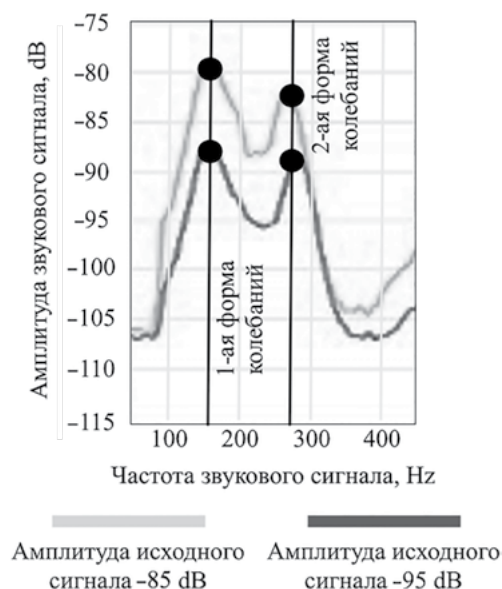


Рис. 6. Замер различных уровней громкости сигнала

Таблица 4. Значения частот форм собственных колебаний при различных уровнях громкости сигнала

№ формы колебаний рельса	Амплитуда исходного сигнала, -85 dB	Амплитуда исходного сигнала, -95 dB
1	158,34 Hz	158,37 Hz
2	282,11 Hz	282,93 Hz

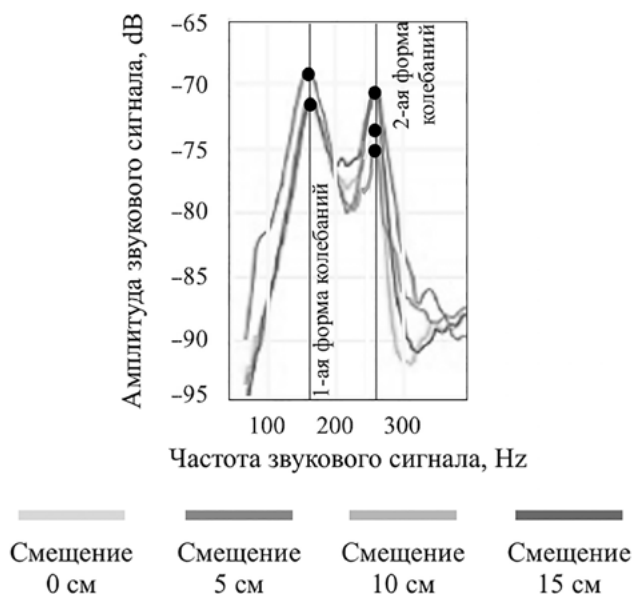


Рис. 7. Частоты собственных колебаний в зависимости от положения динамика в продольном направлении рельса

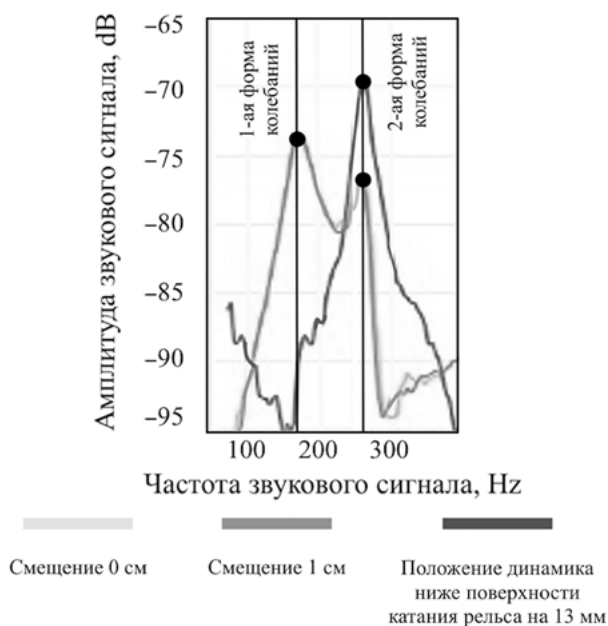


Рис. 8. Частоты собственных колебаний в зависимости от положения динамика в поперечном направлении рельса

Далее был проведен анализ влияния расположения динамика относительно пьезозвукоснимателя. Во время первого эксперимента динамик передвигали вдоль рельса и через каждые 5 сантиметров проводился замер, первое измерение соответствует положению динамика соосно над пьезозвукоснимателем, следующее на расстоянии 5 см от оси пьезозвукоснимателя, затем через 10 см, последнее измерение соответствует смещению оси вибродинамика относительно оси пьезозвукоснимателя на 15 см. Результаты измерений представлены на рис. 7 и в табл. 5.

Во время второго эксперимента динамик передвигался в поперечном направлении относительно рельса на 1 см при каждом измерении, первому измерению соответствует соосное расположение вибродинамика и пьезозвукоснимателя, следующий замер в 1 см от предыдущего, последнее измерение, выполненное на 13 мм ниже поверхности катания. Результаты эксперимента представлен на рис. 8 и в табл. 6.

Проанализировав результаты, полученные в ходе экспериментов, можно сделать вывод о том, что амплитуда исходящего с динамика сигнала не влияет на точность измерений. Изменение во взаимном соосном расположении вибродинамика и пьезозвукоснимателя вызывает существенное изменение амплитуды сигнала, записанного на пьезозвукосниматель после прохождения через рельс, но практически не влияет на точность результатов измерений. Несмотря на незначительные изменения частот форм колебаний, вторая форма сильнее зависит от точности соосного расположения оборудования: разброс

Таблица 5. Значения частот форм собственных колебаний в зависимости от положения динамика в продольном направлении рельса

№ формы колебаний рельса	Смещение 0 см	Смещение 5 см	Смещение 10 см	Смещение 15 см
1	158,24 Hz	158,27 Hz	157,94 Hz	157,98 Hz
2	282,11 Hz	283,03 Hz	281,95 Hz	283,11 Hz

Таблица 6. Значения частот форм собственных колебаний в зависимости от положения динамика в поперечном направлении рельса

№ формы колебаний рельса	Смещение 0 см	Смещение 1 см	Положение динамика ниже поверхности катания рельса на 13 мм
1	158,24 Hz	158,27 Hz	Значение не определено, так как спектр собственных частот в этом интервале не имеет четко выраженного пика
2	282,11 Hz	281,03 Hz	281,95 Hz

результатов измерений составляет около 1 %, тогда как для первой формы колебания изменения не превышают 0,1 %. Кроме того, первая форма колебаний хорошо различима на всех графиках как первый экстремум. Поэтому для дальнейших исследований приоритетна первая форма колебаний, а вторая может служить для дополнительной проверки измерений.

Заключение

Результаты измерений показали, что расположение звукоснимателя относительно динамика оказывает несущественное влияние на частоты собственных колебаний. При этом степень влияния на разные формы колебаний неодинакова. В перспективе необходимо изучить влияние геометрии рельса (вертикальный и горизонтальный износы, длина) и схемы его закрепления на частоты форм собственных колебаний. Предложенный метод демонстрирует высокую точность и перспективен для определения механических напряжений в плетях бесстыкового пути.

Список источников

- Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р).
- Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
- Потапов А. И. Магнитомеханические методы контроля механических свойств ферромагнитных материалов / А. И. Потапов и др. // Дефектоскопия. — 2022. — № 6. — С. 3–24.
- Рычков Д. А. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов конструкций методом фотоупругости / Д. А. Рычков и др. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2016. — № 3(41). — С. 97–107.
- Лобанов Л. М. Метод хрупких тензочувствительных покрытий для определения деформаций и напряжений в элементах конструкций / Л. М. Лобанов и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2021. — № 5. — С. 26–30.
- Методы акустического контроля металлов / под ред. Н. П. Алешина. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
- Тюшев А. Н. Курс лекций по физике. Ч. 3. Колебания и волны. Волновая оптика: учеб. пособие / А. Н. Тюшев, Л. Д. Дикусар. 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: СГГА, 2011. — 194 с.
- Касаткин Б. С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. — Киев: Техника, 1981. — 415 с.
- Буркин С. П. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 248 с.
- Патент РФ № 286273. Пьезоэлектрический звукосниматель / Б. В. Гладков.

Дата поступления: 29.09.2025

Решение о публикации: 22.10.2025

Контактная информация:

ХОДАК Борис Игоревич — аспирант;
borisl20799@inbox.ru

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук,
проф. кафедры «Железнодорожный путь»;
beltukov@pgups.ru

Analysis of factors influencing the accuracy of the results of the method for Analysis of Factors Influencing the Accuracy of Thermal Stress Measurement in Continuous Welded Rails Using Natural Oscillation Frequencies

B. I. Khodak, V. P. Beltiukov

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

For citation: Khodak B. I., Beltiukov V. P. Analysis of Factors Influencing the Accuracy of Thermal Stress Measurement in Continuous Welded Rails Using Natural Oscillation Frequencies // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 975–983. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-975-983

Summary

Purpose: To study the factors that significantly affect the accuracy of thermal stress measurement in continuous welded rails of a railway track through the analysis of natural oscillation frequencies. To improve the method for assessing temperature stresses in track rail sections by using the frequencies of the rail's natural oscillation modes. **Methods:** The research analyses the mathematical model that defines the natural oscillation frequency of rails. The influence of rail temperature on the variations in the rail natural oscillation frequencies have been analyzed. To examine the measurement errors of these frequencies, which are attributed to the forces acting on the rail and the positioning of the sensors that capture the natural oscillation frequencies. Mathematical modelling and numerical analysis techniques were used to determine the impact of each contributing factor. **Results:** The factors contributing to errors in the assessment of temperature stresses have been identified. The factors influencing the accuracy of measuring the natural oscillation frequencies have been established. **Practical significance:** The findings of this research will facilitate the development of more precise and reliable methods for monitoring temperature stresses in continuously welded tracks. Additionally, the results of the study can enhance the method for identifying the natural vibration frequencies for diagnosing temperature stresses in continuous welded track rails.

Keywords: Track facilities, railway track, continuous welded track, temperature-stress state, stress control.

References

1. *Instruktsiya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti (utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14.12.2016 № 2544r)* [Instructions for the Installation, Laying, Maintenance, and Repair of Continuous Welded Track (approved by Order of JSC Russian Railways dated 14.12.2016 № 2544r)]. (In Russian)
2. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t. T. 3: Ul'trazvukovoy kontrol'* [Non-destructive testing: handbook in 7 vols. Vol. 3: Ultrasonic testing]. Ed. by V. V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004, 864 p. (In Russian)
3. Potapov A. I. et al. Magnitomekhanicheskie metody kontrolya mekhanicheskikh svoystv ferromagnitnykh materialov [Magnetomechanical methods for testing mechanical properties of ferromagnetic materials]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy]. 2022, Iss. 6, pp. 3–24. (In Russian)
4. Rychkov D. A. et al. Eksperimental'noe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktsiy metodom fotouprugosti [Experimental study of stress-strain state of structural elements using photoelasticity method]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Bulletin of Tomsk State

University. Mathematics and Mechanics]. 2016, Iss. 3(41), pp. 97–107. (In Russian)

5. Lobanov L. M. et al. Metod khrupkikh tenzochuvstvitel'nykh pokrytiy dlya opredeleniya deformatsiy i napryazheniy v elementakh konstruktsiy [Method of brittle strain-sensitive coatings for determining strains and stresses in structural elements]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. 2021, Iss. 5, pp. 26–30. (In Russian)

6. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* [Methods of acoustic testing of metals]. Ed. by N. P. Aleshin. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1989, 456 pp. (In Russian)

7. Tyushev A. N., Dikusar L. D. *Kurs lektsiy po fizike. Ch. 3. Kolebaniya i volny. Volnovaya optika: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop.* [Course of lectures on physics. Part 3. Vibrations and waves. Wave optics: textbook. 2nd ed., rev. and augm.]. Novosibirsk: SGGA Publ., 2011, 194 p. (In Russian)

8. Kasatkin B. S., Kudrin A. B., Lobanov L. M. et al. *Eksperimental'nye metody issledovaniya deformatsiy i*

napryazheniy [Experimental methods for studying strains and stresses]. Kiev: Tekhnika Publ., 1981, 415 p. (In Russian)

9. Burkin S. P., Shimov G. V., Andryukova E. A. *Ostatochnye napryazheniya v metalloproduktii: uchebnoe posobie* [Residual stresses in metal products: textbook]. Yekaterinburg: Ural Federal University Press, 2015, 248 pp. (In Russian)

10. Gladkov B. V. *P'ezoelektricheskiy zvukosnimatel'* [Piezoelectric pickup]. Patent RF, no. 286273. (In Russian)

Received: September 29, 2025

Accepted: October 22, 2025

Author's information:

Boris I. KHODAK — Postgraduate Student;
boris120799@inbox.ru

Vladimir P. BELTIUKOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; beltukov@pgups.ru



УДК 625.76

Опыт применения методов математического моделирования при обследовании существующего котлована

П. А. Кравченко¹, В. М. Полунин^{2,3}, А. Н. Макаров¹

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

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

³Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Российская Федерация, 127238, Москва, Локомотивный пр., 21

Для цитирования: Кравченко П. А., Полунин В. М., Макаров А. Н. Опыт применения методов математического моделирования при обследовании существующего котлована // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 984–998. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-984-998

Аннотация

Цель: Оценка возможности применения экспериментальных исследований и наблюдений в процессе мониторинга для оценки неопределенных параметров элементов ограждения котлована, в частности длины шпунта. **Методы:** Рассматриваемые и предложенные в настоящей работе методы основаны на определении фактической жесткости элементов ограждения котлована (стальных шпунтовых свай) в реальных условиях работы (в составе существующих конструкций). Методы, описанные в настоящей работе, являются, по сути, натурным экспериментальным исследованием, проведенным в условиях существующего объекта незавершенного строительства. **Результаты:** В настоящей статье приведены результаты подбора недостающих параметров шпунта (длины шпунта) с применением численного моделирования и натурных исследований — измерения деформаций с последующим сопоставлением значений с расчетными значениями. **Практическая значимость:** Обусловлена, в первую очередь, особенностями строительства и реконструкции зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки, когда не обойтись без освоения подземного пространства. Во-вторых, значимость определяется специфическими грунтовыми условиями Санкт-Петербурга, представленными слабыми глинистыми грунтами, перекрываемыми слоями мелких и пылеватых песков относительно небольшой мощности. В силу различных обстоятельств в работу инженеров-геотехников поступают объекты незавершенного строительства, требующие завершения из-за нестабильности технического состояния на том этапе, на котором строительство было остановлено. Необходимо завершить строительно-монтажные работы, однако уже устроенные подземные конструкции (сваи, элементы ограждения котлована, фундаменты и иные конструкции) не могут быть заменены, поскольку их демонтаж представляет опасность для зданий окружающей застройки. Возникает необходимость сохранения и использования уже возведенных конструкций и их элементов. При этом важно собрать достоверные сведения об этих конструкциях — в частности, их прочностные и деформационные параметры.

Ключевые слова: Сваи, реконструкция, шпунт, ограждение котлована, математическое моделирование, обследование котлована.

Введение

На территории современных городов в связи с различными обстоятельствами, периодически сопутствующими проблемам геополитического, экономического, техногенного или иного характера, в зоне существующей застройки возникают объекты незавершенного строительства (рис. 1).

Нередки случаи, когда в период длительного перерыва в строительстве исполнительная документация утрачивается, а сведения о примененных конструкциях и материалах невозможно восстановить из-за полного или частичного отсутствия архивных материалов.

Такие проблемы существенно усложняют возобновление строительства или реконструкцию существующих сооружений. Если учесть, что в подобных ситуациях, как правило, уже оказано ощутимое влияние на окружающую застройку, проведение работ (например, по извлечению шпунта неизвестной длины с последующим устройством нового ограждения) становится опасным и недопустимым.

Если удастся провести инклинометрические исследования [1], определить параметры шпунтового ограждения достаточно просто. Однако такие исследования возможны не всегда. Методы неразрушающего контроля и геофизические методы далеко не во всех случаях позволяют получить однозначное представление об исследуемой конструкции.

При этом длительная эксплуатация элементов ограждения котлована в непроектных условиях влечет ряд проблем, затрагивающих:

- элементы ограждения котлована [2];
- свайное основание [3];
- набережные, попадающие в зону влияния [4].

Подобные случаи неоднократно отмечались в практике.

1. Строительная площадка

В статье представлены результаты наблюдений и расчетов для объекта незавершенного строительства, расположенного в объединенной



Рис. 1. Состояние заброшенного котлована в центре Санкт-Петербурга
(фото из архива П. А. Кравченко)

охранной зоне памятников архитектуры в центре Санкт-Петербурга.

Проектируемый объект — здание спортивно-оздоровительного комплекса с бассейном. Характеристики объекта:

- высота — до 14 м;
- этажность — 3 надземных этажа;
- наличие подземной части — 1 этаж;
- назначение подвальной части — размещение технических помещений бассейна.

Конструктивная схема здания предусматривает:

- внутренний каркас;
- наружные несущие стены.

Основной несущий каркас выполнен из монолитного железобетона.

1.1. Краткое описание геологических условий площадки

Рассматриваемый участок в геоморфологическом отношении расположен в пределах Приневской низменности.

По результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных ЗАО «ЛЕНТИСИЗ» в 2024 г., на площадке выделено 20 инженерно-геологических элементов.

Инженерно-геологические условия площадки типичны для центральной части Санкт-Петербурга. Под толщей насыпных грунтов (мощностью 1,5–3,0 м) вскрыты пески — от пылеватых до крупных, общей мощностью порядка 3–5 м. Пески характеризуются средней плотностью и находятся в водонасыщенном состоянии.

Толща песков подстилается текучими суглинками (в нижней части слоя — текуче-пластичными) общей мощностью 7–10 м, включающими прослой пылеватых песков в рыхлом состоянии мощностью 0,60–1,30 м.

Под слоем суглинков вскрыты пылеватые пластичные супеси с показателем текучести $I_L > 0,5$ мощностью до 3,9 м; ниже залегают супеси

с $I_L < 0,5$ мощностью до 5,5 м. Эти отложения подстилаются пылеватыми суглинками консистенции от полутвердой до твердой. Еще ниже вскрыты легкие пылеватые твердые глины.

На площадке проводилось статическое зондирование. По его результатам мощность «слабых грунтов» на площадке строительства составляет около 9 м (в интервале глубин от 6 до 15 м).

Максимальный уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине 0,6 м.

Ниже приведены результаты статического зондирования (рис. 2).

1.2. Краткая оценка геотехнической ситуации

С целью оценки геотехнической ситуации рассмотрим основные факторы, которые могут привести к развитию деформаций проектируемого здания и зданий, находящихся в зоне влияния нового строительства.

Наличие в основании мощной толщи слабых глинистых отложений

В основании проектируемого здания залегают слабые глинистые отложения текучей консистенции. Глинистые грунты обладают существенной сжимаемостью и малой водопроницаемостью, большие неравномерные осадки основания за счет дополнительного нагружения могут продолжаться десятилетиями и даже столетиями. В связи с этим, как правило, в центральной части Санкт-Петербурга строительство новых зданий осуществляется на свайных фундаментах, передающих нагрузку от здания на нижние относительно малосжимаемые слои грунта.

Наличие существующих эксплуатируемых зданий в зоне влияния строительства

Строительство нового здания должно обеспечить безопасную эксплуатацию зданий, находящихся в зоне влияния нового строительства.

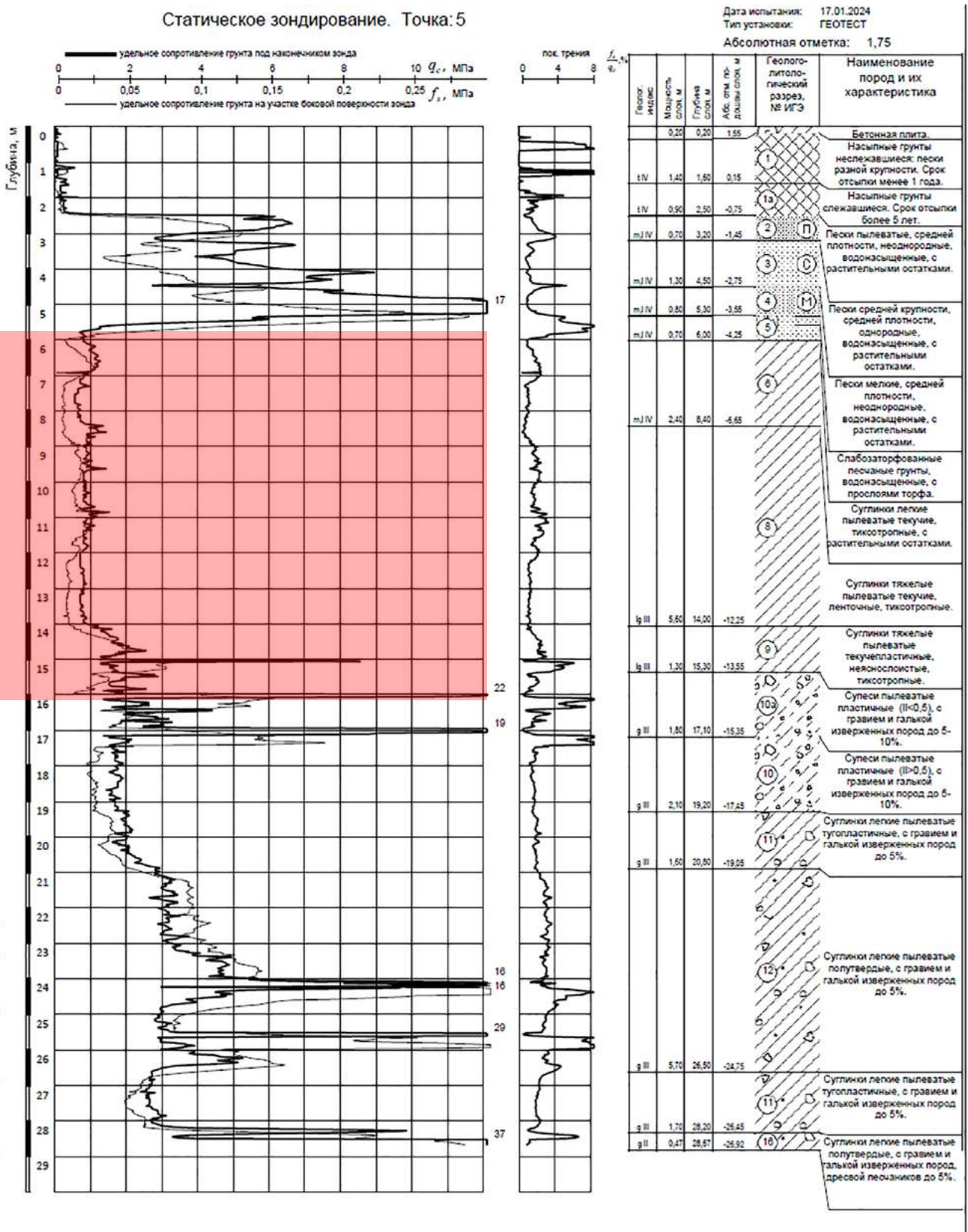


Рис. 2. Статическое зондирование грунтов площадки строительства с выделенной зоной слабых грунтов (зона обозначена красным цветом)

На развитие дополнительных деформаций примыкающей застройки влияют два фактора: нагружение основания весом проектируемого здания, что вызывает развитие воронки оседания вокруг здания, и производство работ нулевого цикла. Исключить недопустимое влияние нового строительства на окружающие сооружения от веса нового здания можно выбором глубины погружения свай и, соответственно, снижением осадки самого проектируемого здания. Опасными технологическими факторами, которые могут вызвать дополнительные осадки примыкающих зданий, являются: процесс устройства свай, устройство ограждения котлована, подвижки ограждения при вскрытии котлована и осушение котлована.

Учитывая эти обстоятельства, а также неблагоприятные в строительном отношении грунтовые условия (характеризуемые наличием мощной толщи слабых глинистых отложений), возведение здания на этой территории следует отнести к третьей, наивысшей категории сложности по ТСН 50-302—2004.

Необходимым требованием при проектировании и строительстве объектов этой категории сложности является осуществление геотехнического сопровождения. На стадии проектирования требуется расчетное геотехническое обоснование не только конструкции, но и щадящей технологии устройства фундаментов. На стадии производства работ — постоянный контроль за принятым в проекте производства работ технологическим регламентом, параметрами колебаний грунта и охраняемых конструкций, а также геодезический контроль осадок соседних зданий.

1.3. Состояние существующих конструкций на момент начала работ по обследованию

Проект реконструкции предусматривает ремонт одного из фасадов, сохранившегося на высоту трех этажей (на всю высоту проектируе-

мого здания), восстановление фасадов боковых флигелей и фасадов во внутренний двор.

Фактически к моменту начала работ по обследованию на строительной площадке сохранилась одна фасадная стена (которая впоследствии должна быть присоединена к вновь возводимому зданию), шпунтовое ограждение котлована и (как было установлено позже) свайное поле (рис. 3).

Демонтаж самого здания, устройство шпунтового ограждения, свай и откопка котлована были выполнены в 2008–2009 гг., и на этом работы были остановлены. Проектирование и строительство здания существенно осложнялись тем, что сохраненная конструкция стены была признана объектом культурного наследия уже после демонтажа здания. С одной стороны котлован примыкает к набережной канала. С этой стороны на этапе строительства была сформирована грунтовая берма. Для проезда спецтехники и временного размещения бытового городка по берме были уложены железобетонные дорожные плиты. Фактическую работу бермы, как отмечалось в исследованиях отечественных ученых [5], достаточно сложно принимать в расчет.

Визуальный осмотр котлована и обследуемых конструкций показал, что специальных консервационных мероприятий, связанных с остановкой производства работ в 2008–2009 гг., не производилось. До начала работ по обследованию (осень 2023 г.) котлован не эксплуатировался, строительные-монтажные работы не производились, что привело в результате к заполнению котлована водой (преимущественно атмосферными осадками) (рис. 4).

Для начала производства работ по обследованию свай и элементов ограждения котлована на основании имеющихся архивных данных и результатов рекогносцировки было выполнено предварительное геотехническое обоснование. Проведение работ по обследованию не пред-

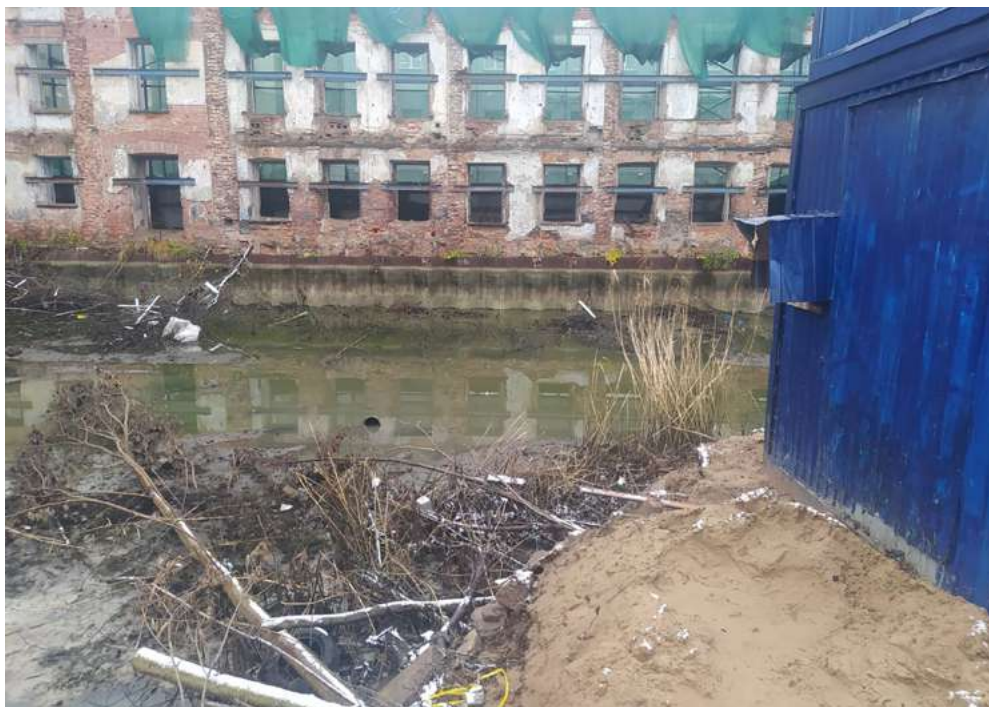


Рис. 3. Сохранившаяся фасадная стена. Вид со стороны строительной площадки (фото из архива П. А. Кравченко)



Рис. 4. Состояние котлована до (слева) и после (справа) откачки воды (фото из архива П. А. Кравченко)

ставлялось возможным без осушения котлована, однако безопасность таких действий вызвала определенные сомнения.

Сечение шпунта было однозначно определено до откачки котлована на доступных для осмотра участках. Было установлено, что применялся

шпунт марки AZ 18 производства Arcelor (установлено по геометрическим размерам сечения шпунтовых свай) (рис. 5).

В результате визуального осмотра установлено, что контур шпунтового ограждения замкнут. Нарушений замковых соединений, следов потери устойчивости или локального разрушения элементов конструкции выявлено не было. По шпунту зафиксирована поверхностная коррозия в объеме, не сказывающемся на работоспособности данных элементов конструкции (рис. 6).

Была предпринята попытка определения длины шпунта свай с применением метода виброакустической диагностики — выполнено измерение параметров распространения акустической волны в теле шпунтовой сваи.

Как видно из графика, в условиях строительной площадки по результатам измерений определить длину шпунтовой сваи не удалось (попытки, предпринятые после откачки котлована, также не увенчались успехом). Это связано с тем, что звуковая волна распределяется в конструкции не только вертикально, но и горизонтально, что создает помехи при обработке результатов диагностики и не позволяет получить корректные данные о длине шпунта.

Свайное основание также было признано непригодным для использования: по результатам исследований установлено, что сваи имеют дефекты, а для учета их как армирующих элементов комбинированного основания [6] сведений недостаточно (дефекты на небольшой глубине не позволяют оценить параметры свай в полном объеме).

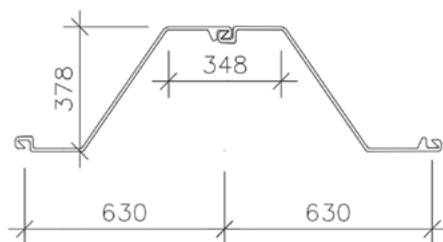


Рис. 5. Шпунт марки AZ 18 производства Arcelor

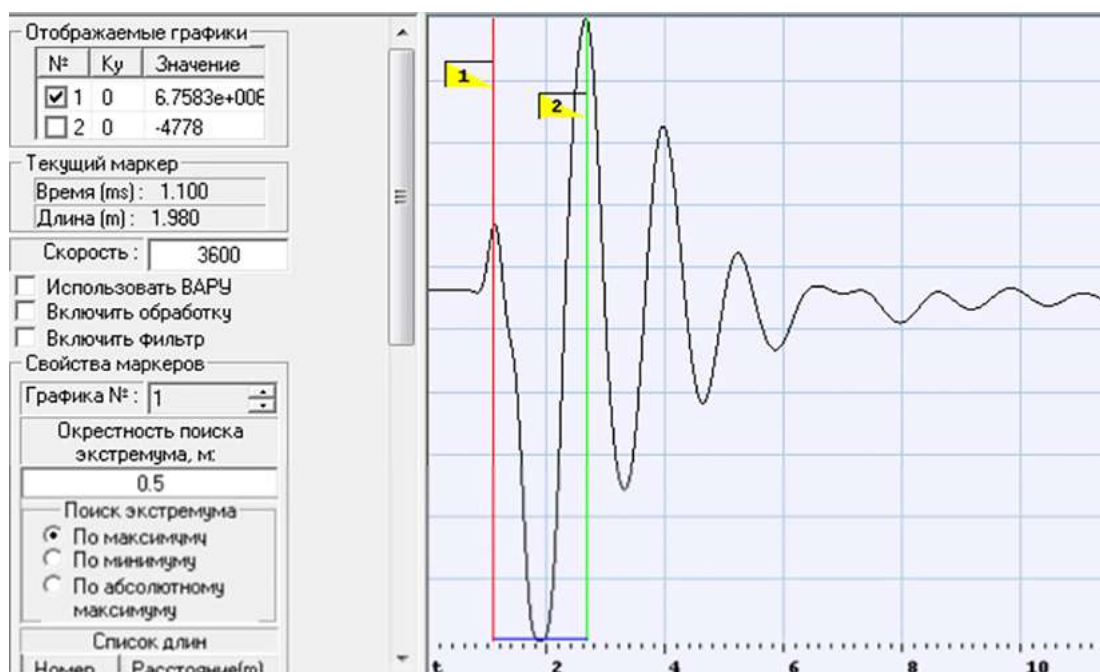


Рис. 6. График распределения ультразвука при обследовании длины шпунта

2. Применение математического моделирования для оценки безопасности работ и подбора параметров шпунта

В результате, с одной стороны, не определена длина шпунта, что, в свою очередь, препятствует дальнейшему прогнозированию. Как неоднократно отмечалось [7, 8], откопка котлованов может оказывать весьма ощутимое влияние на здания окружающей застройки, и для оценки такого влияния параметры элементов ограждения имеют большое значение.

С другой стороны, достоверно известно, что котлован уже был откачан как минимум до отметки оголовков свай и эксплуатировался в таком состоянии некоторое время. Очевидно, деформации шпунтового ограждения и окружающей застройки в результате откопки котлована уже реализовались в 2008–2009 гг., когда на объекте выполнялись буронабивные сваи. Следовательно, откачку можно считать условно безопасной до уровня оголовков свай при обеспечении определенных мероприятий.

В связи с невозможностью установить фактическую длину шпунта методами обследования на предварительно выделенной опытной площадке были выполнены экспериментальные исследования, направленные на определение необходимых параметров.

К моменту откачки котлована с внутренней стороны ограждения за счет имеющейся воды было сформировано гидростатическое давление по внутренней поверхности шпунтового ограждения, препятствующее его деформации.

До момента откачки воды (в состоянии затопленного котлована) выполнены измерения планового положения верха шпунтового ограждения по периметру котлована.

После осушения котлована (снятия гидростатического давления) проведены повторные измерения перемещений верха шпунтового ограждения.

Суть исследования заключалась в следующем: при снятии гидростатического давления происхо-

дит деформация шпунтового ограждения, работающего по консольной схеме. Величина деформации зависит от грунтовых условий, жесткости конструкции (сечение и материал шпунта), величины заделки шпунта в грунт и характера нагружения. В случае если известны все перечисленные параметры, деформация ограждения может быть вычислена.

При решении обратной задачи (при известном перемещении, сечении и материале ограждения, характере нагружения) один из неизвестных параметров прямой задачи (в рассматриваемом случае — величина заделки шпунта) может быть вычислен или подобран.

На основании архивных данных (материалы предыдущего геотехнического обоснования) в первом приближении была принята общая длина шпунта — 19,0 м (3,5 м — глубина котлована, 15,5 м — заделка шпунта в грунты основания).

Перед началом откачки воды из котлована было выполнено моделирование осушения котлована в программном комплексе Plaxis. Для сложных инженерно-геологических условий важен выбор не только программного комплекса, но и моделей грунта, применяемых при расчетах [9, 10]. В связи с этим была выбрана упрочняющаяся модель грунта (Hardening Soil Model).

Ниже (см. рис. 7) приведен вид расчетной схемы существующего котлована с фрагментами прилегающей застройки.

Принимая во внимание, что гидростатическое давление сформировалось после откопки котлована, при моделировании выделялось три этапа.

На первых двух этапах моделировалась откопка котлована и его последующее затопление водой (рис. 8, 9).

На третьем этапе деформации обнулялись (как уже реализовавшиеся на момент обследования) и моделировалась откачка воды из котлована, оценивалась деформация ограждения котлована и окружающей застройки (рис. 10).

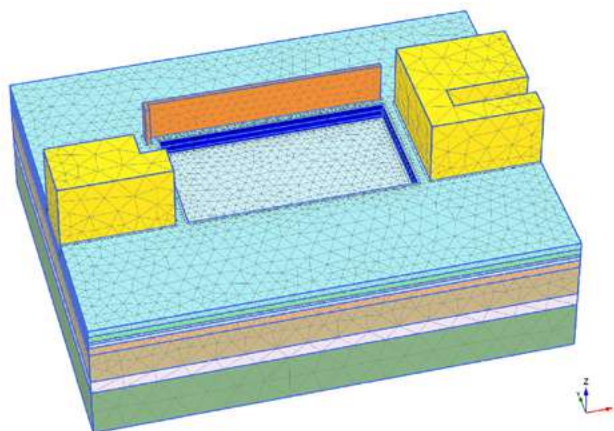


Рис. 7. Модель котлована с примыкающими зданиями и сооружениями

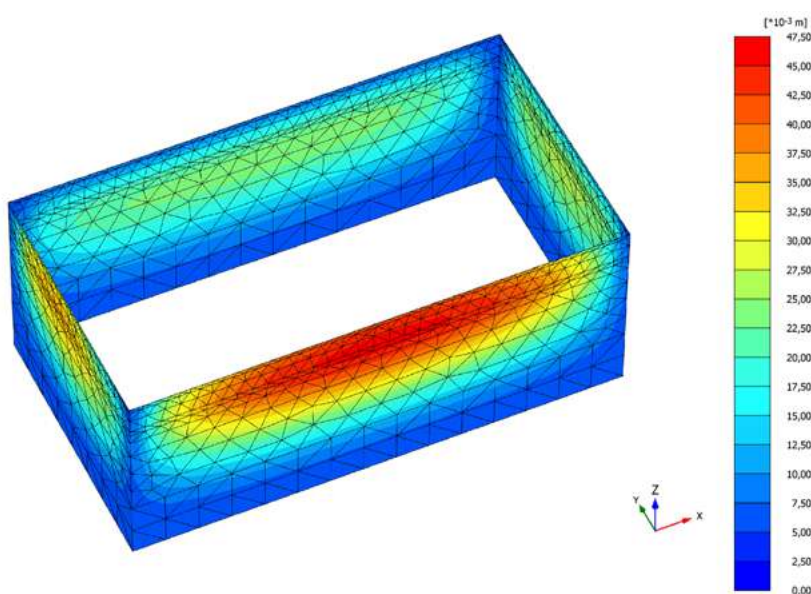


Рис. 8. Изолинии горизонтальных перемещений ограждения после экскавации котлована

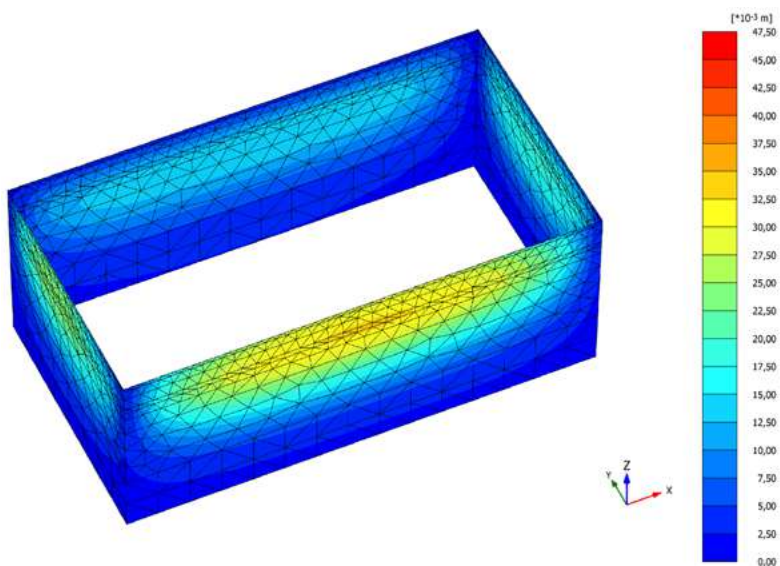


Рис. 9. Изолинии горизонтальных перемещений ограждения после затопления котлована

Результаты математического моделирования этапа осушения котлована показали, что максимальные осадки получает сохраняемая стена здания — не более 2,5 мм. При этом дополнительные осадки примыкающих зданий не превысят 1,4 мм. Анализ полученных результатов внутренних усилий, возникающих на этапе осушения котлована, показал, что откачка воды из

котлована не приводит к существенному изменению НДС окружающего грунта и ограждения котлована (рис. 11).

Были сделаны выводы том, что смещение верха шпунта, не превышающие расчетных значений, не приведут к существенным осадкам окружающей застройки. Результаты расчета показали возможность осушения и расчистки

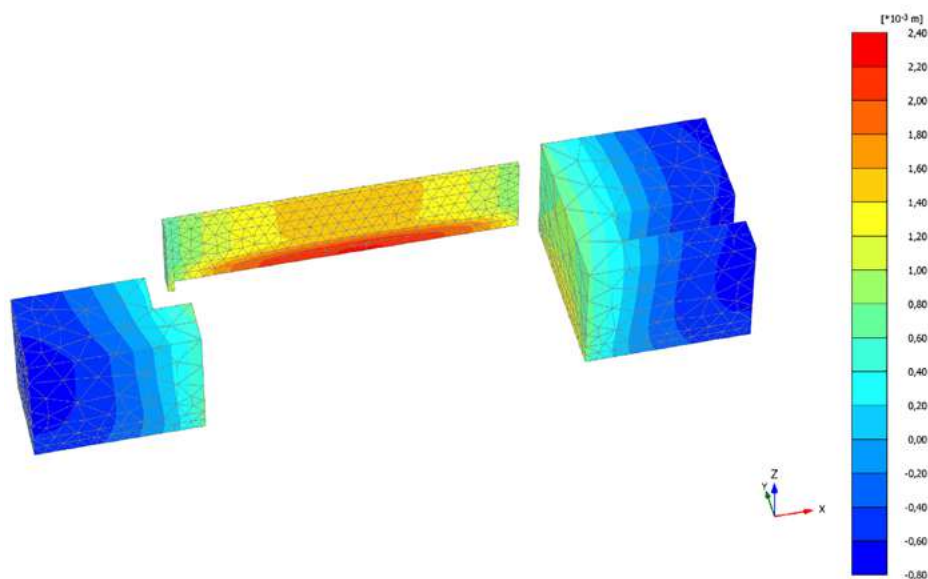


Рис. 10. Дополнительные деформации окружающей застройки после осушения котлована

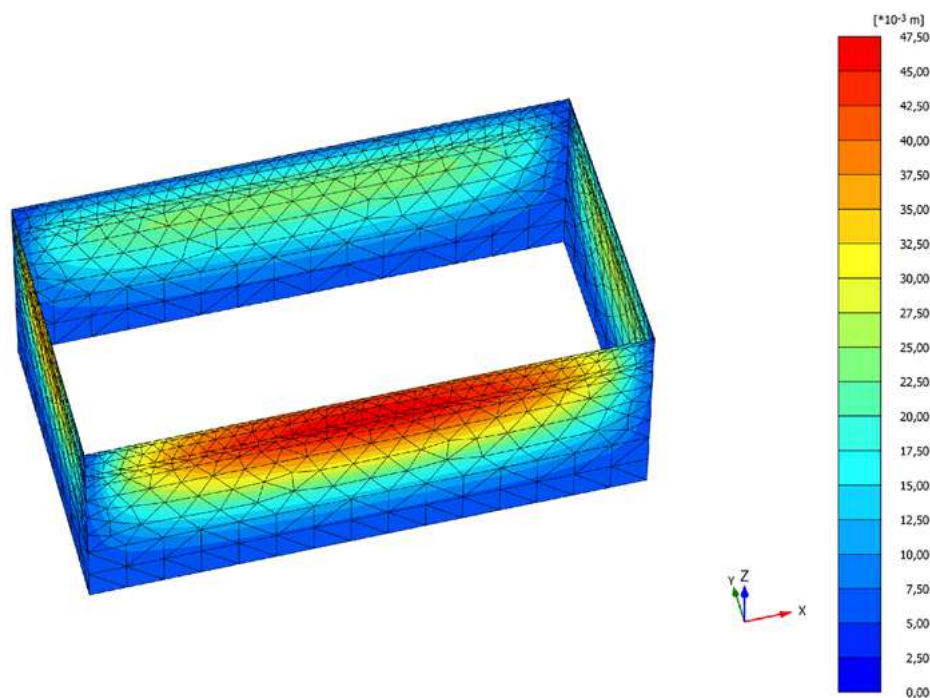


Рис. 11. Изолинии горизонтальных перемещений ограждения после осушения котлована

котлована до уровня планировки, реализованного предыдущими производителями работ (ориентировочно в 2008–2009 гг.).

Перед откачкой котлована были размещены геодезические марки для наблюдений за смещением верха шпунта. Для наблюдений за горизонтальными перемещениями применялся электронный тахеометр Leica FlexLine TS10 R1000 1". Наблюдения выполнялись в период всего процесса откачки и в течение месяца после ее завершения. Измерения деформации шпунта выполнялись силами заказчика. Результаты сопоставления расчетных и фактических деформаций приведены ниже (рис. 12).

Из результатов сопоставления видно, что фактические деформации не превышают расчетных значений при условии, что в расчетах принят шпунт марки AZ 18 длиной от уровня дневной поверхности 19,0 м. Значения фактических деформаций (ниже расчетных) свидетельствуют о том, что при прочих определенных параметрах и характеристиках длина шпунта 19,0 м обеспечивает помимо достаточной точности расчета

достаточный запас в части деформаций шпунта и воздействия на окружающую застройку. В дальнейших геотехнических расчетах был принят шпунт марки AZ 18 длиной от уровня дневной поверхности 19,0 м.

3. Проверка принятых решений в процессе откопки котлована

Моделирование более поздних этапов строительства здания выполнялось с принятыми параметрами шпунта. Велись регулярные наблюдения за деформациями. Проектом предполагалось устройство распорной системы с докопкой котлована на 1,0 м (до глубины 4,5 м) (рис. 13).

На момент написания статьи (октябрь 2024 г.) на площадке завершены работы нулевого цикла, распорные системы демонтированы. Наблюдаемые деформации ограждения котлована и окружающей застройки на различных этапах (докопка котлована, устройство подземного этажа, монтаж распорной системы) составляли менее расчетных. При этом отклонение составляло от 5 % до 10 % на различных этапах.

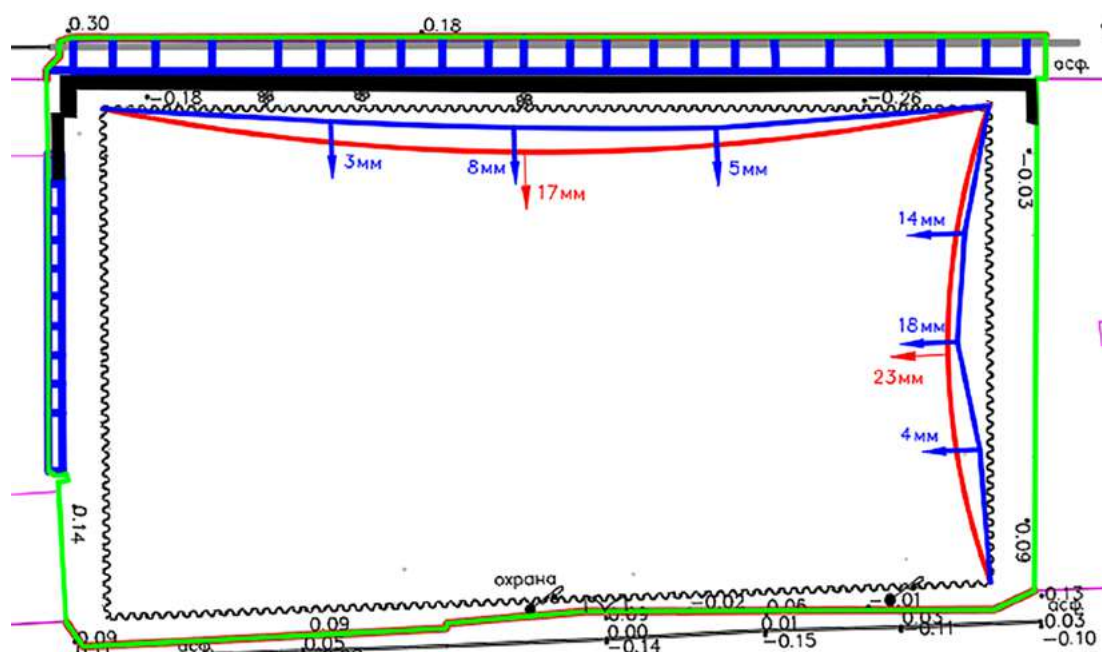


Рис. 12. Результаты сопоставления расчетных (красный цвет) и фактических (синий цвет) деформаций при откачке воды из котлована

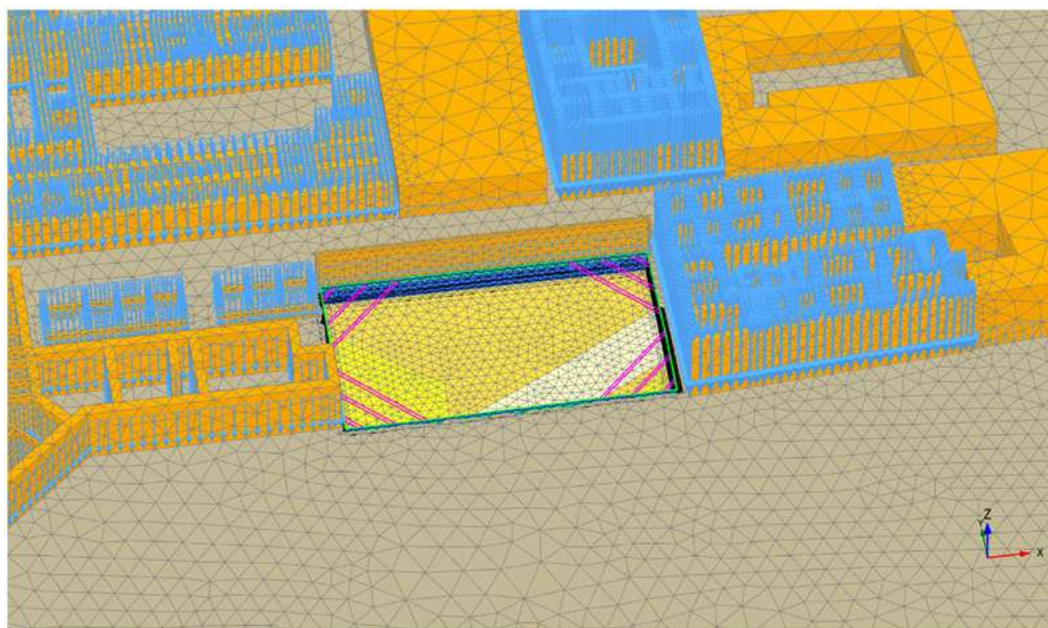


Рис. 13. Вид схемы на этапе откопки котлована с учетом устройства дополнительной распорной системы

Заключение

Нередко проведение опытных исследований на строительных площадках, совмещенное с математическим моделированием, является единственным способом собрать недостающие сведения на объекте о примененных конструктивных решениях. В условиях объектов незавершенного строительства сложность задачи многократно возрастает при необходимости использования существующих конструкций, сведения о которых утрачены. Особенно остро такие проблемы стоят в отношении конструкций, работающих в грунте, где невозможно прямыми методами выполнить измерения искомых параметров, даже геометрических. Одной из таких конструкций является шпунт при отсутствии достоверных сведений о его длине, как было описано в настоящей статье.

В рассмотренном в статье случае величина деформации шпунта может быть вычислена при известных деформационных характеристиках грунта, изгибной жесткости шпунта и величине заделки шпунта в грунт. В случае, когда от определенной нагрузки известно перемещение, реше-

ние обратной задачи позволяет определить неизвестный параметр — в рассмотренном случае длину шпунта.

Проведенное на объекте исследование показало, что при невозможности определения точной длины шпунтового ограждения методами диагностики или при высокой степени опасности его извлечения для осмотра возможно применение опытных исследований на отдельных участках или площадках либо, как описано в статье, на отдельных этапах работ.

Неотъемлемой частью таких исследований является мониторинг конструкций на всех этапах выполнения работ и сопоставление результатов мониторинга с расчетными деформациями, определенными для каждого этапа строительства.

Список источников

1. Osokin A. Determination of the Bending Moment in the Diaphragm Wall by Inclino-metric Observations / A. Osokin, M. Paramonov, I. Dyakonov, I. Bashmakov // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the

Development of Agriculture in the Far East” (AFE 2022), Tashkent, Uzbekistan, 25–28 January 2023. — Vol. 371. — Tashkent, Uzbekistan: EDP Sciences, 2023. — P. 02015. — DOI: 10.1051/e3sconf/202337102015.

2. Метелкин С. В. Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов / С. В. Метелкин, В. Н. Парамонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 133–142. — DOI: 10.20295/1815-588X.2022.1.133.

3. Парамонов В. Н. Горизонтальные смещения свай при разработке котлована // Геотехника. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 46–57.

4. Kudryavtsev S. Numerical Simulation of the Work of a Low-Settlement Embankment on a Pile Foundation in the Process of Permafrost Soil Thawing / S. Kudryavtsev, T. Valtseva, S. Bugunov, Z. Kotenko et al. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. — Vol. 2: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. — Pp. 73–81.

5. Башмаков И. Б. Аналитические подходы к расчету пассивного давления грунта при устройстве грунтовых берм / И. Б. Башмаков, М. С. Баранков, К. В. Сливец // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности : материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов, Санкт-Петербург, 4–6 апреля 2023 г. — М.: Перо, 2023. — С. 14–19.

6. Козловский В. Е. Об осадках конструкций на комбинированных основаниях / В. Е. Козловский, Е. В. Городнова, С. С. Колмогорова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. —

2020. — Т. 22. — № 1. — С. 164–170. — DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-164-170.

7. Парамонов В. Н. Экспериментальная проверка применимости некоторых моделей грунта для расчета ограждений котлованов / В. Н. Парамонов, К. В. Сливец // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2008. — № 4. — С. 139–145.

8. Полищук А. И. Методы расчета влияния котлованов на дополнительные осадки существующих зданий / А. И. Полищук, В. А. Демченко // Материалы Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ / отв. за выпуск А. Г. Коцаев. — Краснодар, 2022. — 147 с.

9. Парамонов В. Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники / В. Н. Парамонов. — СПб.: Геореконструкция, 2011. — 262 с.

10. Парамонов В. Н. Факторы риска при устройстве подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях / В. Н. Парамонов // Жилищное строительство. — 2009. — № 2. — С. 35–37.

Дата поступления: 22.08.2025

Решение о публикации: 23.10.2025

Контактная информация:

КРАВЧЕНКО Павел Александрович — канд. техн. наук; pasha.sky@gmail.com

ПОЛУНИН Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук; n1ce2u@yandex.ru

МАКАРОВ Алексей Николаевич — аспирант; StroiGidroSpas@yandex.ru

The Application of Mathematical Modelling in the Survey of an Existing Excavation Pit

P. A. Kravchenko¹, V. M. Polunin^{2,3}, A. N. Makarov¹

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

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeiskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

³Scientific Research Institute of Structural Physics, Russian Academy of Architecture and Construction, 21, Lokomotivny pr., 127238, Moscow, Russian Federation

For citation: Kravchenko P. A., Polunin V. M., Makarov A. N. The Application of Mathematical Modelling in the Survey of an Existing Excavation Pit // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 984–998. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-984-998

Summary

Purpose: To assess the feasibility of employing experimental studies and observations in the monitoring process to estimate the uncertain parameters of excavation retaining wall elements, specifically focusing on sheet pile lengths. **Methods:** The methods proposed in this paper are centered on determining the actual rigidity of the excavation retaining wall elements (steel sheet piles) under real working conditions within the context of existing structures. Essentially, the methods outlined herein represent a full-scale experimental study conducted at an active construction site. **Results:** This paper presents the findings related to the identification of the missing sheet pile parameters, specifically sheet lengths, through numerical modelling and field investigations that included deformation measurements, which were then compared to the calculated values. **Practical significance:** The practical relevance of this research is largely attributed to the distinctive challenges faced in the construction and renovation of buildings and structures in densely populated urban environments, where the effective use of underground space is vital. Furthermore, the significance is heightened by the specific ground conditions of St. Petersburg, which are marked by weak clay soils that are topped by relatively thin layers of fine and dusty sands. Geotechnical engineers often face the challenge of incomplete construction projects that necessitate completion due to the instability of the technical condition at the point where construction was interrupted. It is crucial to finalize the ongoing construction and installation works; however, the existing underground structures, such as piles, excavation retaining elements, foundations, or other installations, cannot be removed, as their dismantling could jeopardize adjacent buildings. Consequently, it is imperative to maintain and make use of the existing structures and their components while collecting accurate information about these structures, particularly, about their strength and deformation characteristics.

Keywords: Piles, reconstruction, sheet piling, excavation retaining wall, mathematical modelling, excavation survey.

References

1. Osokin A., Paramonov M., Dyakonov I., Bashmakov I. Determination of the Bending Moment in the Diaphragm Wall by Inclino-metric Observations. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE 2022), Tashkent, Uzbekistan, 25–28 January 2023, vol. 371. Tashkent, Uzbekistan: EDP Sciences, 2023, p. 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/202337102015.
2. Metelkin S. V., Paramonov V. N. Moroznoe puchenie i ego vliyanie na raspornuyu sistemu ograzhdayushchikh konstruktsiy glubokikh kotlovanov [Frost heaving and its impact on the bracing system of deep excavation walls].

Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, Iss. 19(1), pp. 133–142. DOI: 10.20295/1815-588X.2022.1.133. (In Russian)

3. Paramonov V. N. Gorizontaľnye smeshcheniya svay pri razrabotke kotlovana [Horizontal displacements of piles during excavation]. *Geotekhnika* [Geotechnics]. 2018, Iss. 10(4), pp. 46–57. (In Russian)

4. Kudryavtsev S., Valtseva T., Bugunov S., Kotenko Z. et al. Numerical Simulation of the Work of a Low-Settlement Embankment on a Pile Foundation in the Process of Permafrost Soil Thawing. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, 2019, vol. 2: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019, pp. 73–81.

5. Bashmakov I. B., Barankov M. S., Slivets K. V. Analiticheskie podkhody k raschetu passivnogo davleniya grunta pri ustroystve gruntovykh berm [Analytical approaches to calculating passive earth pressure in soil berm construction]. *Sovremennye vyzovy transportnoy otrasli: novye vozmozhnosti, Sankt-Peterburg, 4–6 aprelya 2023 g.* [Modern challenges of the transport industry: new opportunities: materials of the interuniversity scientific-practical conference of transport universities, Saint Petersburg, 4–6 April 2023]. Moscow: Pero Publ., 2023, pp. 14–19. (In Russian)

6. Kozlovskiy V. E., Gorodnova E. V., Kolmogorova S. S. Ob osadkakh konstruktsey na kombinirovannykh osnovaniyakh [On settlements of structures on combined foundations]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2020, Iss. 22(1), pp. 164–170. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-164-170. (In Russian)

7. Paramonov V. N., Slivets K. V. Eksperimental'naya proverka primenimosti nekotorykh modeley grunta dlya rascheta ograzhdeniy kotlovanov [Experimental verification of applicability of some soil models for calculating excava-

tion supports]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2008, Iss. 4, pp. 139–145. (In Russian)

8. Polishchuk A. I., Demchenko V. A. Metody rascheta vliyaniya kotlovanov na dopolnitel'nye osadki sushchestvuyushchikh zdaniy [Methods for calculating the impact of excavations on additional settlements of existing buildings]. *Materialy Yubileynoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu Kubanskogo GAU* [Materials of the Jubilee scientific-practical conference dedicated to the 100th anniversary of Kuban State Agrarian University]. Krasnodar, 2022, 147 p. (In Russian)

9. Paramonov V. N. *Metod konechnykh elementov pri reshenii nelineynykh zadach geotekhniki* [Finite element method in solving nonlinear geotechnical problems]. Saint Petersburg: Georekonstruktsiya Publ., 2011, 262 p. (In Russian)

10. Paramonov V. N. Faktory riska pri ustroystve podzemnykh sooruzheniy v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [Risk factors in constructing underground structures in complex engineering-geological conditions]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2009, Iss. 2, pp. 35–37. (In Russian)

Received: August 22, 2025

Accepted: October 23, 2025

Author's information:

Pavel A. KRAVCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; pasha.sky@gmail.com

Vyacheslav M. POLUNIN — PhD in Engineering, Associate Professor; n1ce2u@yandex.ru

Alexey N. MAKAROV — Postgraduate Student; leshchenko2004m@gmail.com

УДК 624.044

Математическое моделирование системы «вода — грунтовый массив — опускная секция»

А. А. Сокольников, Я. В. Мельник, А. П. Ледяев, А. В. Пинчук

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

Для цитирования: Сокольников А. А., Мельник Я. В., Ледяев А. П., Пинчук А. В. Математическое моделирование системы «вода — грунтовый массив — опускная секция» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 999–1012. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-999-1012

Аннотация

Цель: Разработка рекомендаций по построению математической модели методом конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния опускных секций в системе «вода — грунтовый массив — опускная секция». **Методы:** Математическое моделирование методом конечных элементов и методом Метрогипротранса. **Результаты:** При сравнении метода Метрогипротранса с моделированием тоннелей способом опускных секций методом конечных элементов, учитывающим этапы производства работ, выявлены дополнительные силовые эффекты воздействия грунтового основания и призм сползания обратной засыпки. В ходе математического моделирования системы «вода — грунтовый массив — опускная секция» был обнаружен неочевидный эффект гидростатического давления изнутри секции. Для устранения данного эффекта были предложены и проанализированы три варианта решения: задание специального материала заполнения секций; приложение «противодавления» изнутри секции; замена функции *Water level* на равномерно распределенные нагрузки на каждом этапе моделирования. По результатам сравнительного анализа были выбраны наиболее эффективные варианты, обеспечивающие оптимальное сочетание удобства моделирования и наилучшей сходимости с методом Метрогипротранса. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования конструкций для моделирования системы «вода — грунтовый массив — опускная секция» методом конечных элементов.

Ключевые слова: Подводный тоннель, опускные секции, математическое моделирование, метод конечных элементов, МКЭ, метод Метрогипротранса, HRM.

Введение

Тоннели, сооружаемые способом опускных секций, являются эффективным вариантом преодоления водных препятствий. Способ заключается в изготовлении на специальных строительных площадках герметичных железобетонных тоннельных секций с их последующей стыковкой между собой в заранее разработанной подводной траншее. Способ позволяет добиваться экономической эффективности в сравнении с мостовым вариантом ввиду отсутствия протяженных

подъездных путей, необходимых для соблюдения мостом судоходного габарита. На сегодняшний день способом опускных секций по всему миру построено около двухсот подводных тоннелей, тогда как в России этим способом был построен только один тоннель в Санкт-Петербурге — Канонерский тоннель в 1983 г.

Несмотря на то, что в нашей стране опыт строительства опускных секций давно утерян, разработаны подробные рекомендации по их проектированию и статическому расчету [1].

В инженерной среде большое распространение получил расчет опускных секций как стержневых конструкций в упругой среде по методу Метрогипротранса (другие названия: метод Метропроекта, *Hyperstatic Rection Method, HRM*). Но, как отмечалось в [2], у метода Метрогипротранса имеется существенный недостаток в части задания свойств окружающего грунтового массива. Для описания грунтовой среды используется всего одна характеристика — коэффициент упругого отпора (или коэффициента постели в случае рассмотрения плитных конструкций). В методе конечных элементов, напротив, упругий отпор определяется автоматически в процессе силового взаимодействия конструкции и грунтового массива, что особенно актуально в случае основания, сложенного разными грунтами, как в большинстве геологических формаций акваторий [3].

За последние годы в мировой науке выполнено большое количество исследований, посвященных вопросу проектирования, строительства и содержания тоннелей из опускных секций. По большей части исследования посвящены построению аналитических моделей, учитывающих работу стыков секций [4–9]. Также выполнены исследования, посвященные проблеме текущего содержания секций [10], влиянию гидродинамики волн и судов [11, 12], восприятию секциями сейсмических воздействий [13]. Куда в меньшей степени исследован вопрос оценки напряженно-деформированного состояния секций. В последних исследованиях по этой тематике [14, 15] авторы выполняли расчеты секций методом конечных элементов в упругих грунтовых массивах, а гидростатическое давление воды задавали активными нагрузками.

В то же время современные высокопроизводительные расчетные программные комплексы, реализующие метод конечных элементов, позволяют моделировать условия погружения конструкции и грунта обратной засыпки в воду,

определять поровое давление грунта, рассматривая тем самым систему «вода — грунтовый массив — опускная секция». Таким образом, целью исследования является разработка рекомендаций по построению математических моделей методом конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния опускных секций в системе «вода — грунтовый массив — опускная секция».

В процессе исследований для решения задач методом конечных элементов применялся специализированный геотехнический программный комплекс *Midas GTS NX*. Для решения задач методом Метрогипротранса применялся программный комплекс РК-6 (учебная версия), разработанная ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс».

1. Постановка задачи

Поперечное сечение секции (рис. 1) разработано в процессе выполнения дипломного проекта А. В. Пинчука «Проектирование подводного автодорожного тоннеля» в рамках строительства второй кольцевой автодороги (КАД-2) через Неву в районе города Отрадное. Толщина наружных стен секции составляет 1200 мм, внутренних — 800 мм. Постоянство толщины позволяет представить элементы конструкции одномерными стержневыми конечными элементами.

Математическая модель показана на рис. 2. Синей линией на рисунке показан уровень воды в акватории. Мощность грунта засыпки над тоннелем составляет 3,6 м, глубина воды — 12 м. Грунтовый массив представлен плоскими конечными элементами размером от 2 до 0,5 м. Всего в модели 5251 узел и 5367 элементов.

Физико-механические характеристики материала конструкций приняты как для бетона класса В30: объемный вес $\gamma = 24 \text{ кН/м}^3$, модуль упругости $E = 32\,500 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$.

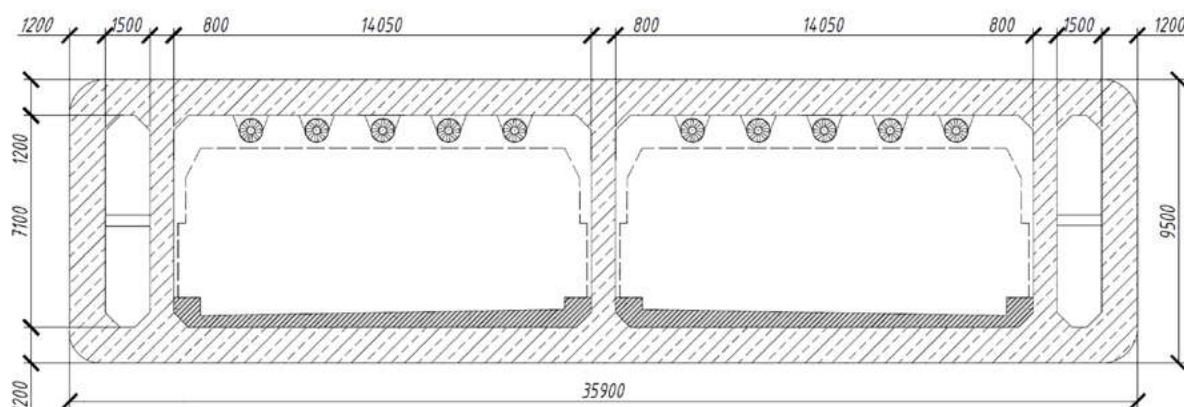


Рис. 1. Поперечное сечение тоннельной секции

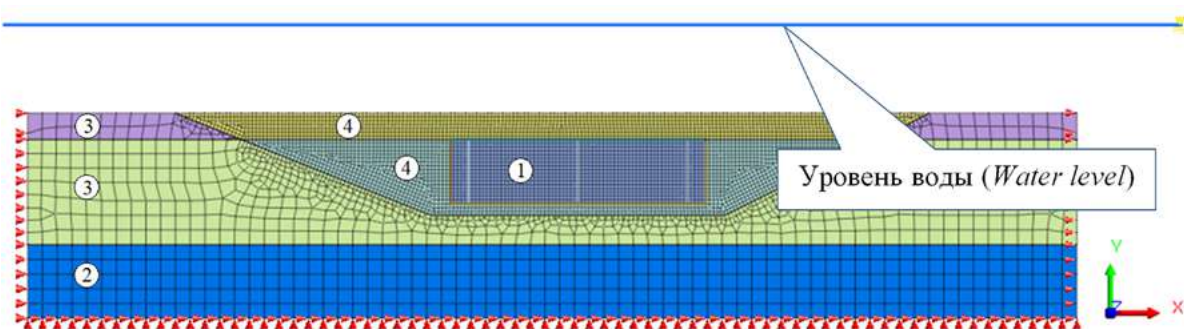


Рис. 2. Математическая модель опускной секции:

1 — элементы заполнения; 2 — котлинские глины; 3 — супесь; 4 — обратная засыпка

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунтов

Грунт	Супесь	Котлинские глины	Песок крупный
Объемный вес в сухом/ водонасыщенном состоянии, γ , кН/м ³	20/21	22/22	18/21
Коэффициент пористости, e	0,5	—	0,6
Модуль упругости, E_{50} , МПа	12	200	50
Коэффициент Пуассона, ν	0,31	0,23	0,3
Сцепление, C , кПа	20	300	1
Угол внутреннего трения, ϕ	30	22	32

Для упрощения модели был рассмотрено три типа грунта: супеси и подстилающие их коренные котлинские глины, а также грунт обратной засыпки — песок крупный. Физико-механические характеристики грунтов были описаны геомеханической моделью Мора — Кулона (табл. 1).

Уровень воды был задан функцией *Water Level*, сообщающей дренирующим грунтам характеристики обводненных грунтов. Помимо этого, функция *Water Level* автоматически вычисляет давление воды на поверхность грунта.

Процесс сооружения подводного тоннеля разбит на три этапа:

1. Создание начального напряженного состояния с обнулением исторических перемещений.

2. Разработка траншеи. На этом этапе деформации также обнуляются из предположения, что на мелком заложении перераспределение напряжений происходит одновременно с извлечением грунта.

3. Установка секции и обратная засыпка.

2. Неочевидная проблема с функцией уровня воды

Одна из наиболее частых инженерных ошибок, возникающих при создании математических моделей, связана с тем, что расчетчик «осознает» моделируемые объекты, в то время как компьютерная программа этого не делает. Даже самый совершенный программный комплекс «не понимает» не только концепцию тоннеля как инженерного сооружения, но даже идею пустого пространства внутри конструкции. В нашем случае это выглядит следующим образом.

В то время как расчетчик на этапе сооружения опускной секции воспринимает отсутствие конечных элементов внутри стержневой конструкции как воздушное пространство внутри тоннеля, функция *Water level* сообщает давление воды на каждую открытую поверхность ниже своего уровня, в том числе и на внутреннюю поверхность секции.

В отсутствие открытого доступа к алгоритмам программного комплекса это предположение можно доказать на примере построенной нами модели следующим образом. Рассмотрим две задачи без верхних конечных элементов засыпки и грунта (см. рис. 2, верхние группы элементов «3» и «4»). В первой задаче «пустое пространство» внутри секции закрыто перекрытием (рис. 3), во второй — секция открыта (рис. 4).

Для исключения различного характера деформирования секций в этих задачах в месте сопряжения стен секций с перекрытием были заданы запреты горизонтальных перемещений.

Результаты расчета на рис. 5 и 6 показывают давление на грунт по подошве секции, равное весу столба воды и собственному весу плиты основания — что в одном, что в другом случае (погрешность в 0,4 % обуславливается работой решателя).

Эти расчеты доказывают, что для корректной оценки напряженно-деформированного состоя-

ния секции следует разработать алгоритм моделирования системы «вода — грунтовый массив — опускная секция», в которой внутри секции будет задано атмосферное давление.

3. Варианты создания атмосферного давления внутри секции

3.1. Задание *s*-материала заполнения

В первом варианте математической модели на этапе сооружения секции заполним ее внутреннее пространство неким искусственным материалом. В дальнейшем будем использовать термин *s*-материал (от английского *strange* — «странный»). Характеристики этого материала примем такими, чтобы они математически фигурировали во всех уравнениях системы, но фактически не оказывали влияние ни на какие параметры напряженно-деформированного состояния. Опишем этот материал линейно-деформируемой моделью и зададим следующие значения его характеристик:

- объемный вес $\gamma = 0,00001 \text{ кН/м}^3$ (примерно 1 г на м^3);
- модуль упругости $E = 1 \text{ кПа}$ (в 1000 раз меньше, чем у текучих грунтов);
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$.

Влияние коэффициента Пуассона на получаемые результаты оказалось минимальным, вследствие чего для корректной работы системы было принято решение устанавливать его в диапазоне 0,2–0,3, избегая как чрезмерно малых, так и чрезмерно больших значений.

Нагрузки от гидростатического давления будем получать автоматически с помощью функции *Water level*.

По результатам выполненного расчета, представленным на рис. 7, установлено, что материал заполнения секции практически не влияет на напряженно-деформированное состояние секции и массива, однако эффективно препятствует про-

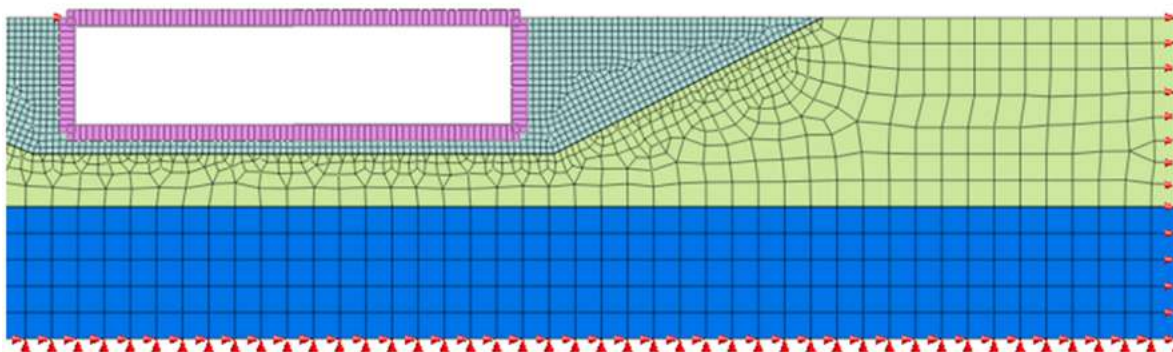


Рис. 3. Математическая модель опускной секции с плитой перекрытия без верхних конечных элементов засыпки и грунта

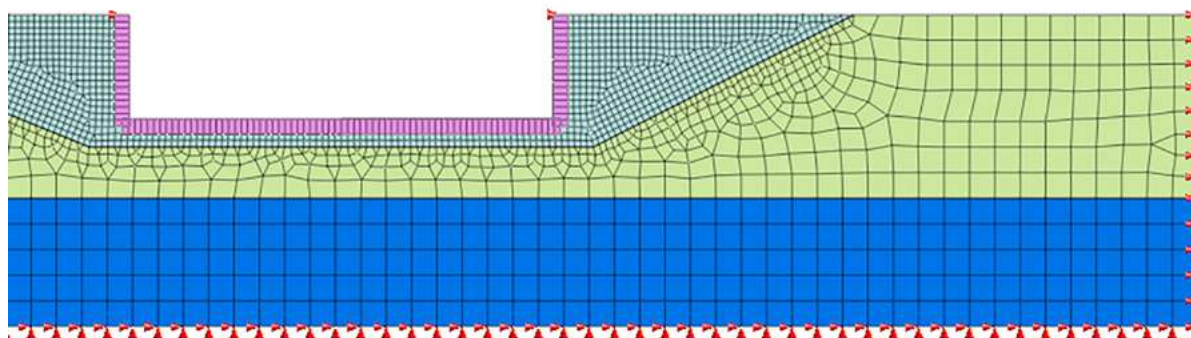


Рис. 4. Математическая модель опускной секции без плиты перекрытия без верхних конечных элементов засыпки и грунта

никновению гидростатического давления внутрь секции.

Эпюры изгибающих моментов и нормальных сил представлены на рис. 8 и 9. Общий вид эпюр будет одинаковым для всех дальнейших вариантов создания атмосферного давления внутри секции. Количественное сопоставление значений между собой выполнено в табл. 2 в конце статьи.

3.2. Задание противодействия

Во втором варианте математической модели создание атмосферного давления внутри секции заключается в приложении «противодавления» на стены секции, которое равняется значению гидростатического давления с обратным знаком и тем самым его уравнивает.

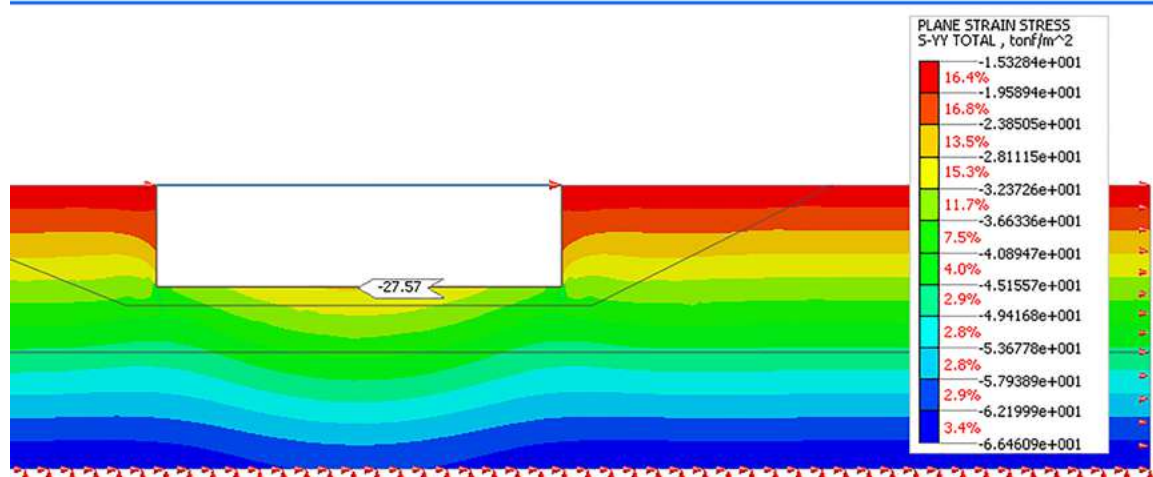


Рис. 5. Изополя вертикальных напряжений в массиве (опускная секция с плитой перекрытия)

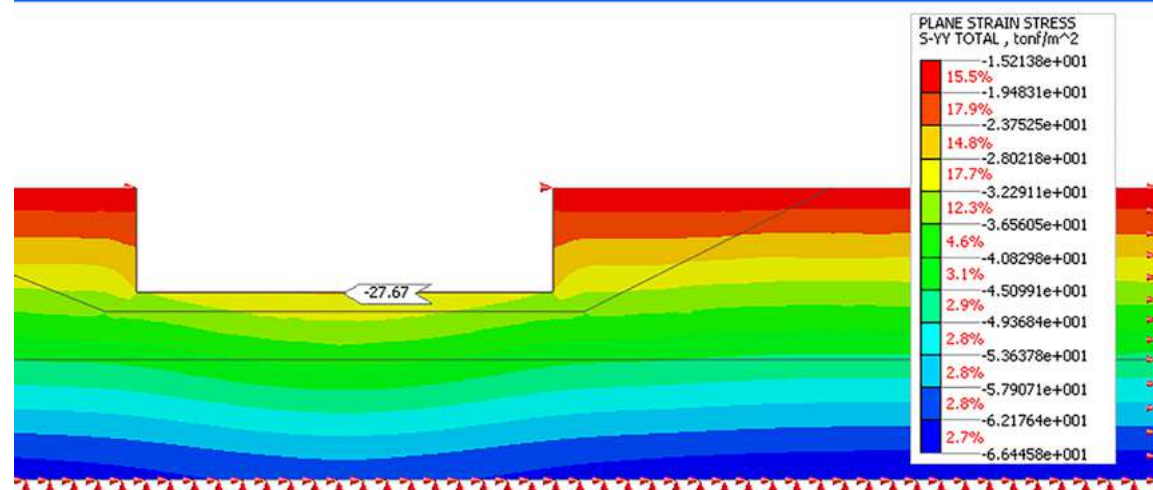


Рис. 6. Изополя вертикальных напряжений в массиве (опускная секция без плиты перекрытия)

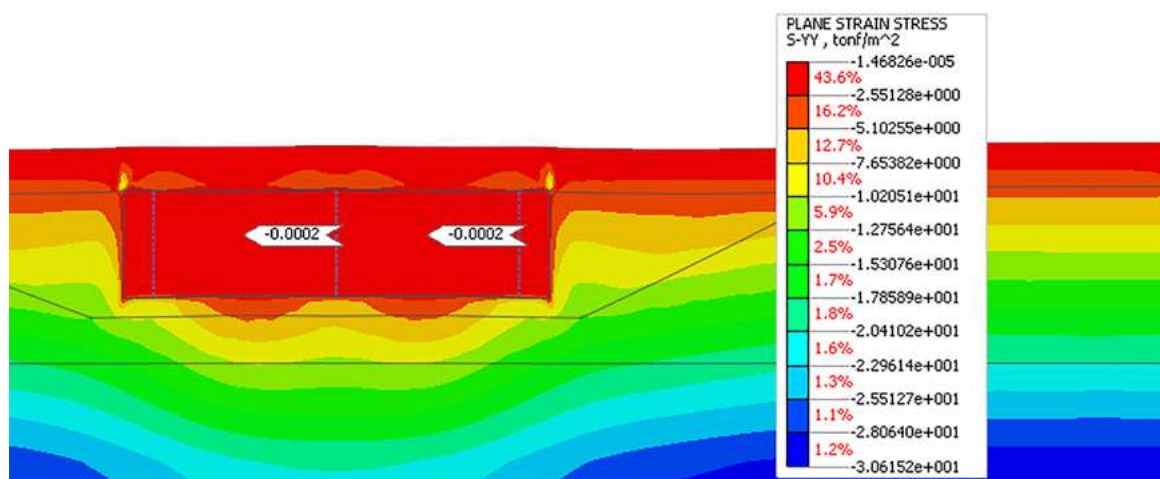


Рис. 7. Изополя вертикальных напряжений в массиве (опускная секция с s-материалом заполнения)

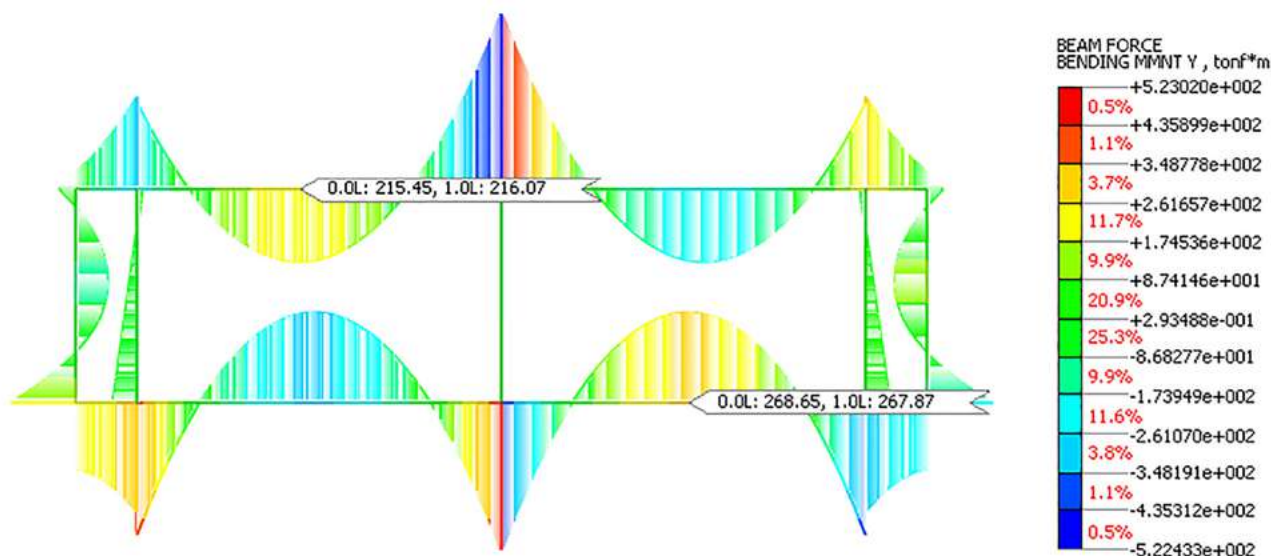


Рис. 8. Эпюра изгибающих моментов в секции по результатам расчета методом конечных элементов

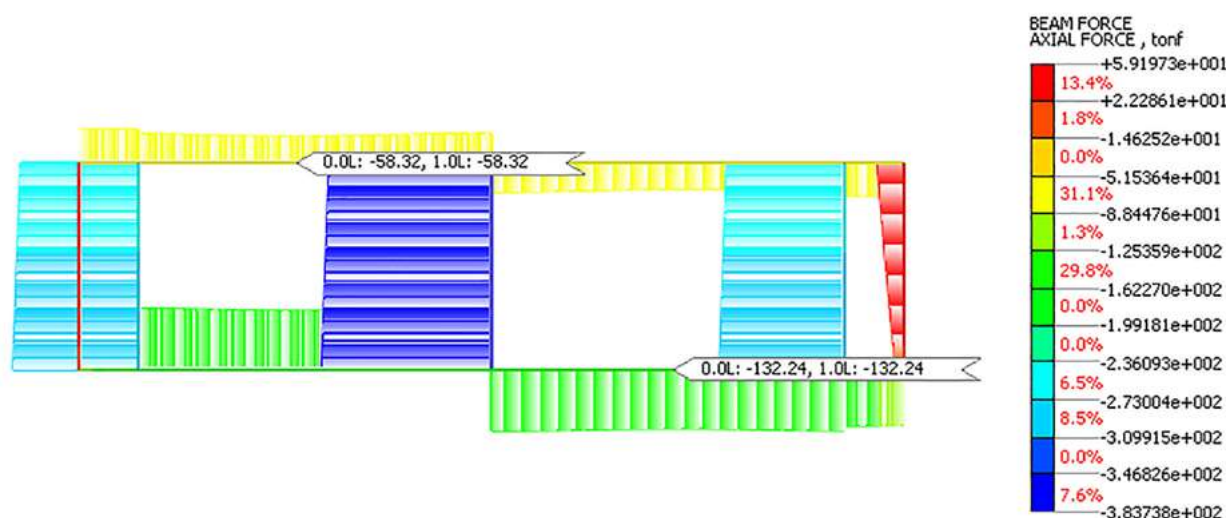


Рис. 9. Эпюра нормальных сил в секции по результатам расчета методом конечных элементов

В *Midas GTS NX* существует возможность указать функцию увеличения давления с глубиной и корректно приложить «противодавление» к конечным элементам внутри секции (рис. 10).

Нагрузки от гидростатического давления, как и в первом варианте, определяются автоматически с помощью функции *Water level*.

Общий вид эпюр изгибающих моментов и нормальных сил соответствует рис. 8 и 9. Количественное сопоставление значений приведено в табл. 2 в конце статьи.

3.3. Задание нагрузок в явном виде

В третьем варианте математической модели была выполнена попытка отказаться от функции *Water level* и задать нагрузки от гидростатики в явном виде. Как видно из рис. 11, этот вариант требует активации и деактивации соответствующих нагрузок на каждом из этапов расчета:

- на этапе начального напряженного состояния активируется нагрузка «1»;
- на этапе откопки траншеи активируется нагрузка «2» и деактивируется нагрузка «1»;

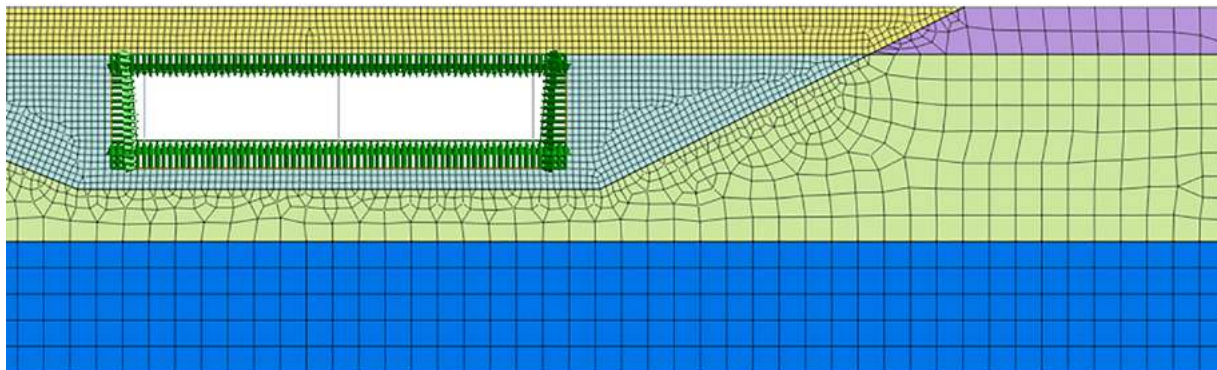


Рис. 10. Приложение «противодавления» к элементам внутри секции

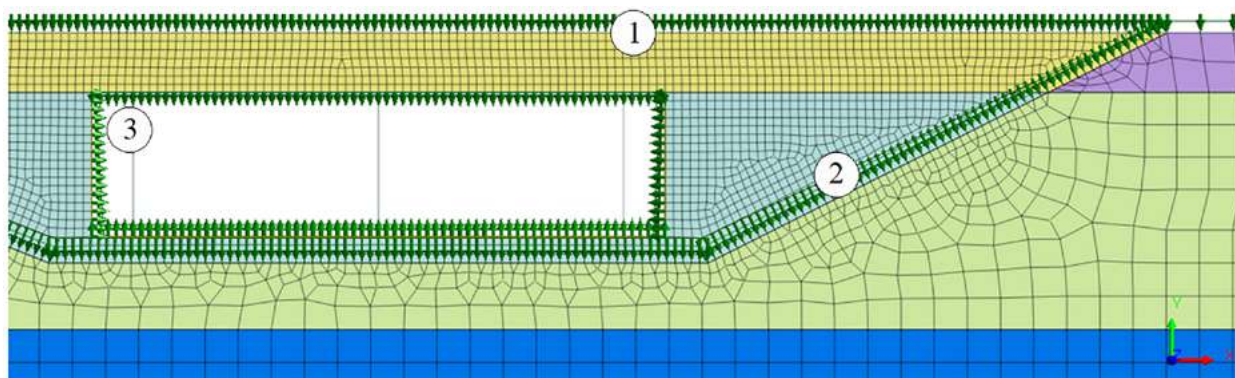


Рис. 11. Приложение нагрузок от гидростатического давления в явном виде:

1 — нагрузка на этапе начального напряженного состояния; 2 — нагрузка на этапе откопки траншеи; 3 — добавочная нагрузка на секцию

– на этапе сооружения секции активируются нагрузки «1» и «3» и деактивируется нагрузка «2».

При этом нагрузки «2» и «3» должны учитывать изменение давления с глубиной, а нагрузка «3» — учитывать только добавочное значение гидростатического давления к нагрузке «1». Вес обводненного грунта при этом следует задавать во взвешенном состоянии.

В совокупности выполнение большого числа операций значительно усложняет расчет и повышает вероятность допустить ошибку по причине человеческого фактора.

Общий вид эпюр изгибающих моментов и нормальных сил также соответствует рис. 8 и 9.

Количественное сопоставление значений между собой выполнено в табл. 2 в конце статьи.

4. Построение расчетной схемы методом Метрогипротранса

Для наиболее полного сравнительного анализа сопоставим результаты математического моделирования методом конечных элементов со статическим расчетом по методу Метрогипротранса в соответствии с рекомендациями [1]. Построение расчетной схемы выполним в программе РК-6 (учебная версия). В случае симметричной конструкции в программе можно выполнить построение половины расчетной схемы (рис. 12).

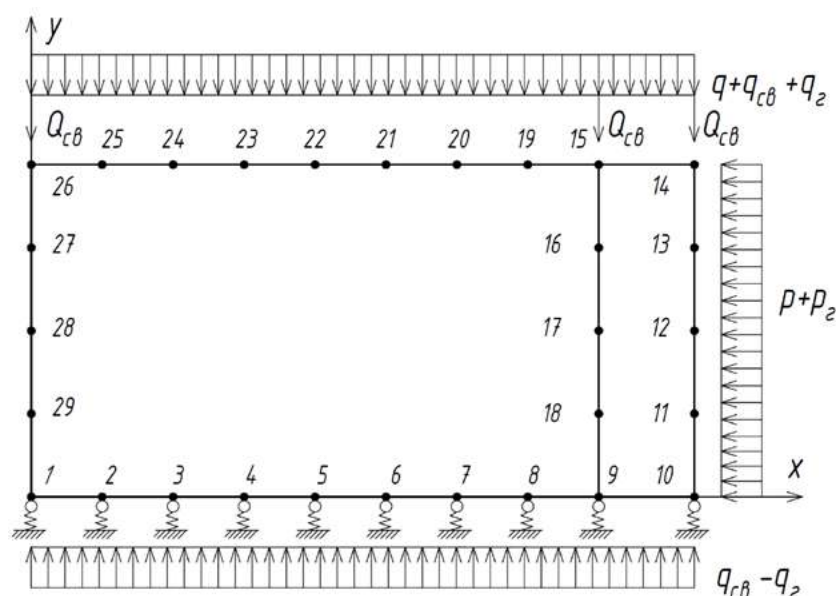


Рис. 12. Расчетная схема по методу Метрогипротранса

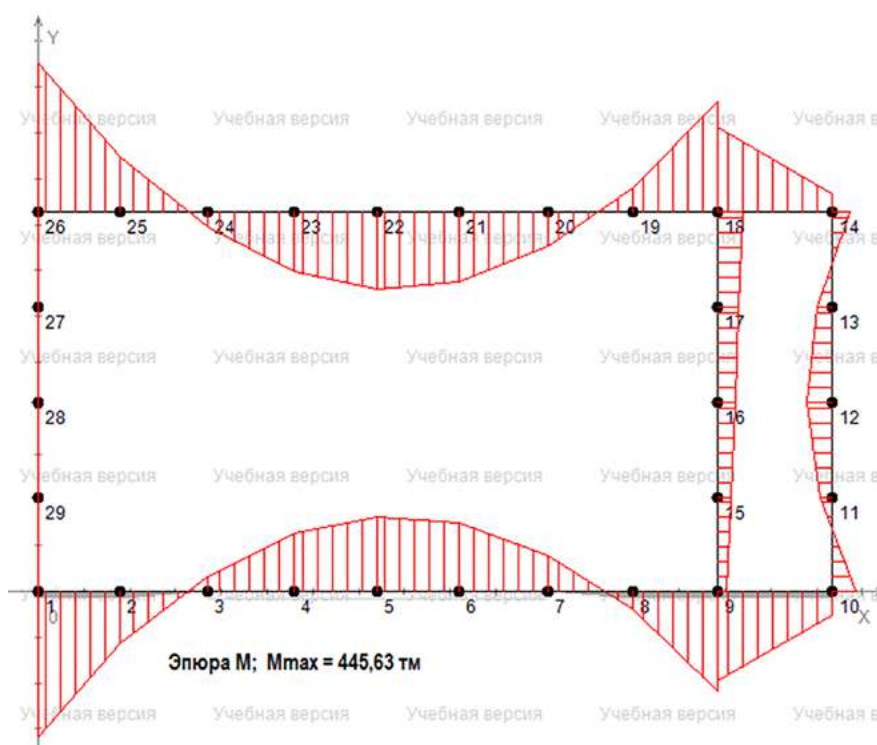


Рис. 13. Эпюра изгибающих моментов в секции по результатам расчета методом Метрогипротранса

Все нагрузки, приложенные к расчетной схеме, задаются в явном виде, а именно:

q — вертикальная распределенная нагрузка от давления грунта, т/м^2 ;

$q_{св}$ — вертикальная распределенная нагрузка от собственного веса конструкции, т/м^2 ;

q_r — вертикальная распределенная нагрузка от гидростатического давления, т/м^2 ;

p — горизонтальная распределенная нагрузка от давления грунта, т/м^2 ;

p_r — горизонтальная распределенная нагрузка от гидростатического давления, т/м^2 ;

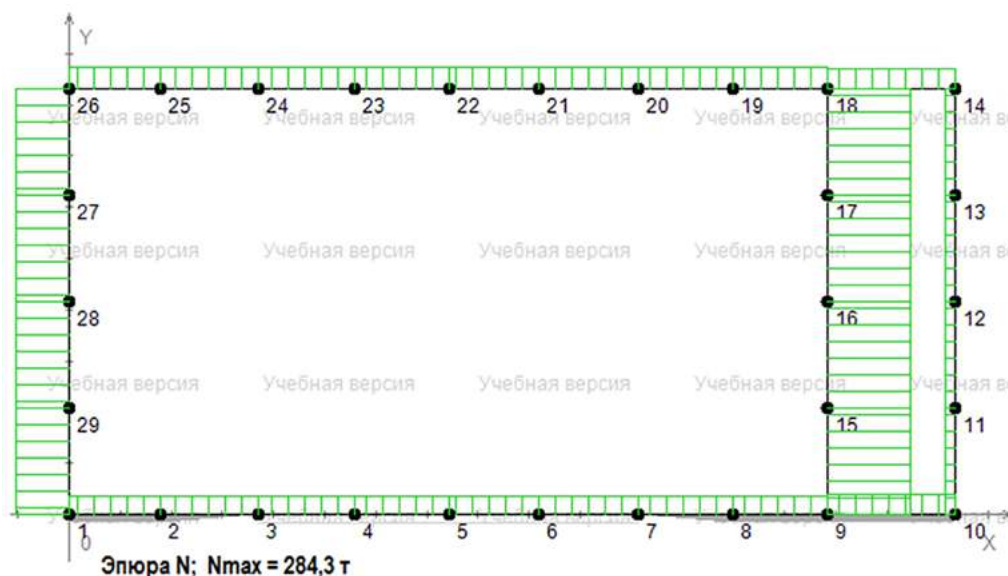


Рис. 14. Эпюра нормальных сил в секции по результатам расчета методом Метрогипротранса

$Q_{св}$ — сосредоточенная нагрузка от собственного веса внутренних стен, т.

Следует отметить, что горизонтальные распределенные нагрузки принимались средними в пределах высоты секции.

Грунтовое основание секции моделируется упругими опорами (пружинами) с коэффициентом постели, равным 5000 т/м^3 . Установлено, что изменение значения коэффициента постели в 0,5–2 раза оказывает влияние на величину внутренних усилий незначительно — в пределах 2 %.

Эпюры изгибающих моментов и нормальных сил показаны на рис. 13 и 14. Их общий вид соответствует эпюрам на рис. 8 и 9. Количественное сопоставление значений между собой выполнено в табл. 2.

5. Сравнение математических моделей

Количественное сопоставление значений расчетов между собой приведено в табл. 2. В качестве критериев сравнения были выбраны изгибающие моменты и нормальные силы в наиболее ответственных элементах секции — в перекрытии и в лотковой плите.

По причине отсутствия результатов натурных экспериментов или физического моделирования

сравнение вариантов математических моделей проводилось относительно результатов расчета по методу Метрогипротранса как наиболее распространенного и обоснованного в инженерной среде.

Усилия в плите перекрытия оказались сопоставимыми, но несколько меньшими в расчетах по методу конечных элементов по сравнению с расчетом по методу Метрогипротранса. Разница по изгибающему моменту составляет менее 10 %, а по нормальной силе — около 20–30 %. Это может объясняться тем, что нагрузка от горизонтального давления грунта и гидростатики в РК-6 была задана большей, чем она есть на уровне перекрытия (среднее значение вместо минимального). Наибольшее отличие от результатов расчета по методу Метрогипротранса наблюдается в третьем варианте математической модели.

Напротив, усилия в лотковой плите оказались больше по методу конечных элементов по сравнению с методом Метрогипротранса. Разница по изгибающему моменту в первых двух вариантах составляет около 20 %, а по нормальной силе — 100–110 %. В третьем варианте разница еще более значительная — почти 50 и 230 % по моменту и нормальной силе соответственно.

Таблица 2. Сопоставление значений расчетов

	ПК-6	Midas GTS NX					
		Вариант 1	%	Вариант 2	%	Вариант 3	%
Перекрытие секции							
M , тм	232,95	216,07	−7	216,67	−7	240,07	3
N , т	72,01	58,32	−19	55,51	−23	50,51	−30
Лотковая плита секции							
M , тм	226,59	268,65	19	274,18	21	337,26	49
N , т	64,94	132,24	104	137,33	111	212,28	227

Причина различий в результатах расчета по разным методам заключается в том, что метод конечных элементов более точно учитывает пластическую работу грунта основания и подстилающих слоев, а также более корректно определяет давление призм сползания грунта засыпки по сравнению с ручным расчетом заданных нагрузок в методе Метрогипротранса.

При сравнении вариантов математического моделирования методом конечных элементов установлено, что наиболее сопоставимыми являются первый и второй варианты — с s -элементами заполнения и с приложением «противодавления» соответственно. Эти варианты, помимо удовлетворительной сходимости с расчетом по методу Метрогипротранса, также отличаются относительной простотой моделирования

Выводы

В процессе математического моделирования могут проявляться неочевидные математические эффекты, например, гидростатическое давление изнутри секции. По результатам исследования предложены варианты устранения данного эффекта. С инженерной точки зрения все они представляют собой «математические костыли» — искусственно вводимые параметры,

позволяющие корректно моделировать реальные объекты.

После сопоставления трех вариантов «математических костылей» выбраны два наиболее эффективных с точки зрения моделирования, обеспечивающих наилучшую сходимость с методом Метрогипротранса:

- задание s -элементов заполнения внутреннего пространства секции;
- приложение «противодавления», уравновешивающего гидростатическое давление внутри секции.

Математическое моделирование подводных тоннелей, сооружаемых способом опускных секций, методом конечных элементов с учетом этапов производства работ позволяет учитывать дополнительные силовые эффекты воздействия грунтового основания и призм сползания обратной засыпки по сравнению с традиционным методом Метрогипротранса.

К неоспоримым преимуществам метода конечных элементов относятся:

- автоматическое определение давления воды;
- учет порового давления грунта.

Учет этих факторов требует усиления лотковой плиты конструкции, что не отражается в расчетах по методу Метрогипротранса.

Список источников

1. Маковский Л. В. Подводные транспортные тоннели из опускных секций / Л. В. Маковский, В. В. Кравченко. — Москва: Кнорус, 2020. — 144 с.
2. Сокольников А. А. Расчет обделки на заданные нагрузки методом конечных элементов и методом Метрогипротранса / А. А. Сокольников, А. Н. Коньков // Путевой навигатор. — 2023. — № 56(82). — С. 42–51.
3. Shaposhnikov E. A. Sediments of an underwater tunnel constructed by the immersed sections method / E. A. Shaposhnikov, I. V. Melnik // E3S web of conferences. — 2024. — Vol. 549. — DOI: 10.1051/e3sconf/202454903030.
4. Li Y. Seismic performance study of immersed tunnel with longitudinal limit device of flexible joint / Y. Li, J. Lai, Y. Yang, J. Zhou et al. // Underground Space. — 2025. — Vol. 20. — Pp. 17–32. — DOI: 10.1016/j.undsp.2024.04.007.
5. Hao D. Experimental study on the mechanical response model of the vertical shear key under typical deformation of segmental joints of the in-service immersed tunnel / D. Hao, G. Hongyan, Ch. Liang, X. Jiang et al. // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2025. — Vol. 157. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106337.
6. Su Ch. Mechanical behavior of immersed tunnel under the influence of differential settlements: A case study of GZ tunnel / Ch. Su, A. Che, Z. Xu, Zh. Han et al. // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2024. — Vol. 151. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.105873.
7. Hart C. M. P. 't The influence of spatial variation on the design of foundations of immersed tunnels: Advanced probabilistic analysis / C. M. P. 't Hart, O. Morales-Nápoles, B. Jonkman // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2024. — Vol. 147. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.105624.
8. Li J. Experimental study on joint behaviour of immersed tunnel subjected to differential settlement / J. Li, P. Ni, Zh. Lu // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2025. — Vol. 156. — DOI: 10.1016/j.tust.2024.106261.
9. Tang C. Enhanced elastic beam model with BADS integrated for settlement assessment of immersed tunnels / C. Tang, S.-Y. He, Z. Guan, W.-H. Zhou et al. // Underground Space. — 2023. — Vol. 12. — Pp. 79–88. — DOI: 10.1016/j.undsp.2023.02.005.
10. He S.-Y. Settlement-based triple factor framework for long-term safety assessment of immersed tunnel / S.-Y. He, C. Tang, M. Pan, W.-H. Zhou // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2025. — Vol. 162. — DOI: 10.1016/j.tust.2025.106597.
11. Bai X. An integrated model for seabed liquefaction analysis around an immersed tunnel with a backfilled trench under wave-current hydrodynamics / X. Bai, H. Luo, Q. Wang, K. Zhao et al. // Ocean Engineering. — 2025. — Vol. 331. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121335.
12. Zhou Y. Numerical study on hydrodynamic analysis and resonant behavior of the immersed tunnel suspended by barge / Y. Zhou, L. Chen, Z. Sun, P. Zhang // Ocean Engineering. — 2025. — Vol. 332. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121362.
13. Wang B. Seismic response analysis of the three-dimensional model of immersed tunnel considering offshore site factors / B. Wang, S. Hu, W. Hu, G. Song et al. // Structures. — 2025. — Vol. 75. — DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108589.
14. Hu Z.-n. Mechanical and Failure Characteristics of Shear Keys on Immersed Tunnel Segment Joints under Differential Settlements / Hu Z.-n., Xie Y.-l. // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 166. — Pp. 373–378. — DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.564.
15. Wu M. Risk Assessment of Operation Period Structural Stability for Long and Large Immersed Tube Tunnel / M. Wu, Q. Zhang, S. Wu // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 166. — Pp. 266–278. — DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.549.

Дата поступления: 06.07.2025

Решение о публикации: 03.09.2025

Контактная информация:

СОКОРНОВ Антон Александрович —

ст. преподаватель; scarlunch@mail.ru

МЕЛЬНИК Яна Владленовна — канд. техн. наук, доц.;

melnik-yana@yandex.ru

ЛЕДЯЕВ Александр Петрович — д-р техн. наук, проф.;

ledyaev@pgupstm.ru

ПИНЧУК Александр Владимирович — студент;

alexandrepinchuk@yandex.ru

Mathematical Modelling of the “Water — Ground Mass — Immersed Section” System

A. A. Sokornov, I. V. Melnik, A. P. Ledyayev, A. V. Pinchuk

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

For citation: Sokornov A. A., Melnik I. V., Ledyayev A. P., Pinchuk A. V. Mathematical Modelling of the “Water — Ground Mass — Immersed Section” System // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 999–1012. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-999-1012

Summary

Purpose: To formulate recommendations for constructing a mathematical model using the finite element method for determining the stress-strain state of immersed sections within the “water — ground mass — immersed section” system. **Methods:** The finite element method and the Metrogiprotrans technique were used. **Results:** When comparing the Metrogiprotrans technique with the finite element method for modelling the immersed tunnel sections that considers construction stages, additional force impacts from the soil foundation and the effects of sliding backfill prisms have been identified. During the mathematical modelling of the “water — ground mass — immersed section” system, an unexpected mathematical phenomenon related to hydrostatic pressure exerted from within the section has been discovered. Three potential solutions have been put forward to mitigate this effect: the introduction of a specified filling material for the sections, the application of internal “back pressure” within the section, and the substitution of the “*Water Level*” function with a consistent distribution of loads at each simulation stage. Following the comparative analysis of the options, the most effective solution, from a modelling perspective, that aligned with the Metrogiprotrans method, has been chosen. **Practical significance:** The study’s outcomes can be applied during the design phase of structures to effectively model the “water — ground mass — immersed section” system using the finite element method.

Keywords: Underwater tunnel, immersed sections, mathematical modelling, finite element method (FEM), Metrogiprotrans method, HRM.

References

1. Makovskiy L. V., Kravchenko V. V. *Podvodnye transportnye tunnели из opusknykh sektsiy* [Underwater transport tunnels from lowering sections]. Moscow: Knorus Publ., 2020, 144 p. (In Russian)
2. Sokornov A. A., Kon’kov A. N. Raschet obdelki na zadannye nagruzki metodom konechnykh elementov i metodom Metrogiprotransa [Calculation of lining for specified loads by the finite element method and the Metrogiprotrans method]. *Putevoy navigator* [Route navigator]. 2023, Iss. 56(82), pp. 42–51. (In Russian)
3. Shaposhnikov E. A., Melnik I. V. Sediments of an underwater tunnel constructed by the immersed sections method. E3S web of conferences, 2024, vol. 549. DOI: 10.1051/e3sconf/202454903030.
4. Li Y., Lai J., Yang Y., Zhou J. et al. Seismic performance study of immersed tunnel with longitudinal limit device of flexible joint. *Underground Space*, 2025, vol. 20, pp. 17–32. DOI: 10.1016/j.undsp.2024.04.007.
5. Hao D., Hongyan G., Liang Ch., Jiang X. et al. Experimental study on the mechanical response model of the vertical shear key under typical deformation of segmental joints of the in-service immersed tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, vol. 157. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106337.

6. Su Ch., Che A., Xu Z., Han Zh. et al. Mechanical behavior of immersed tunnel under the influence of differential settlements: A case study of GZ tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, vol. 151. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105873.
7. Hart C. M. P. 't, Morales-Nápoles O., Jonkman B. The influence of spatial variation on the design of foundations of immersed tunnels: Advanced probabilistic analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, vol. 147. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105624.
8. Li J., Ni P., Lu Zh. Experimental study on joint behaviour of immersed tunnel subjected to differential settlement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, vol. 156. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106261.
9. Tang C., He S.-Y., Guan Z., Zhou W.-H. et al. Enhanced elastic beam model with BADS integrated for settlement assessment of immersed tunnels. *Underground Space*, 2023, vol. 12, pp. 79–88. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.02.005.
10. He S.-Y., Tang C., Pan M., Zhou W.-H. Settlement-based triple factor framework for long-term safety assessment of immersed tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, vol. 162. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106597.
11. Bai X., Luo H., Wang Q., Zhao K. et al. An integrated model for seabed liquefaction analysis around an immersed tunnel with a backfilled trench under wave-current hydrodynamics. *Ocean Engineering*, 2025, vol. 331. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121335.
12. Zhou Y., Chen L., Sun Z., Zhang P. Numerical study on hydrodynamic analysis and resonant behavior of the immersed tunnel suspended by barge. *Ocean Engineering*, 2025, vol. 332. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121362.
13. Wang B., Hu S., Hu W., Song G. et al. Seismic response analysis of the three-dimensional model of immersed tunnel considering offshore site factors. *Structures*, 2025, vol. 75. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108589
14. Hu Z.-n., Xie Y.-l. Mechanical and Failure Characteristics of Shear Keys on Immersed Tunnel Segment Joints under Differential Settlements. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 166, pp. 373–378. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.564.
15. Wu M., Zhang Q., Wu S. Risk Assessment of Operation Period Structural Stability for Long and Large Immersed Tube Tunnel. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 166, pp. 266–278. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.549.

Received: July 06, 2025

Accepted: September 03, 2025

Author's information:

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer;
scarlunch@mail.ru

Iana V. MELNIK — PhD in Engineering, Associate
Professor; melnik-yana@yandex.ru

Alexandr P. LEDYAEV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; ledyaev@pgupstm.ru

Alexandr V. PINCHUK — Undergraduate;
alexandrepinchuk@yandex.ru

УДК 624.6.012.45

Анализ напряженного состояния узла объединения стойки и пролетного строения рамного железобетонного моста в условиях деформаций ползучести и усадки

Р. А. Авхимович, С. В. Чижов

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

Для цитирования: Авхимович Р. А., Чижов С. В. Анализ напряженного состояния узла объединения стойки и пролетного строения рамного железобетонного моста в условиях деформаций ползучести и усадки // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1013–1024. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1013-1024

Аннотация

Цель: Оценить влияние долгосрочных деформаций (вызванных ползучестью и усадкой бетона) на напряженно-деформированное состояние (НДС) узла жесткого объединения стойки с пролетным строением рамного моста и верифицировать применимость современных моделей ползучести и усадки для данного типа конструкций. **Методы:** Выполнено численное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программе Midas Civil. Учтены нелинейные долгосрочные эффекты ползучести и усадки бетона, а также потери преднапряжения арматуры. **Результаты:** Установлено, что усадка бетона оказывает наибольшее влияние на продольные деформации и усилия в узле на ранней стадии эксплуатации. Ползучесть бетона частично компенсирует напряжения, возникающие от усадки. Наибольшие изменения усилий наблюдаются в течение первого года эксплуатации, затем темпы их изменения существенно снижаются. Результаты подтверждают необходимость корректного учета долгосрочных деформаций при проектировании. **Практическая значимость:** Представленные результаты позволяют повысить точность прогноза поведения узлов жесткого объединения стойки и пролетного строения рамных мостов, снизить риск образования трещин и повышенных остаточных напряжений, что способствует увеличению надежности и долговечности мостовых сооружений.

Ключевые слова: Предварительно напряженный железобетон, мост, прогнозирование долгосрочных деформаций бетона, усадка, ползучесть, рамные мосты.

Введение

Реологические свойства бетона, такие как ползучесть и усадка, оказывают существенное воздействие на долгосрочное поведение монолитных железобетонных мостов [1–6]. Существуют различные модели для прогнозирования ползучести и усадки (например, модели по ACI 209 [1], Eurocode 2 [6], ВЗ [7]), однако их применимость и точность для конкретных узлов конструкции требуют дополнительной верификации с учетом реальных условий возведения и эксплуатации,

особенностей армирования и предварительного напряжения. На стадии строительства и после ее завершения происходит уменьшение длины пролетных строений, вызванное влиянием эффектов усадки и ползучести бетона. Особенно это актуально для рамных мостов с узлами жесткого объединения стойки с пролетным строением, так как они воспринимают значительные продольные усилия, вызванные этими процессами (рис. 1). Некорректный учет таких воздействий может привести к появлению значительных остаточных

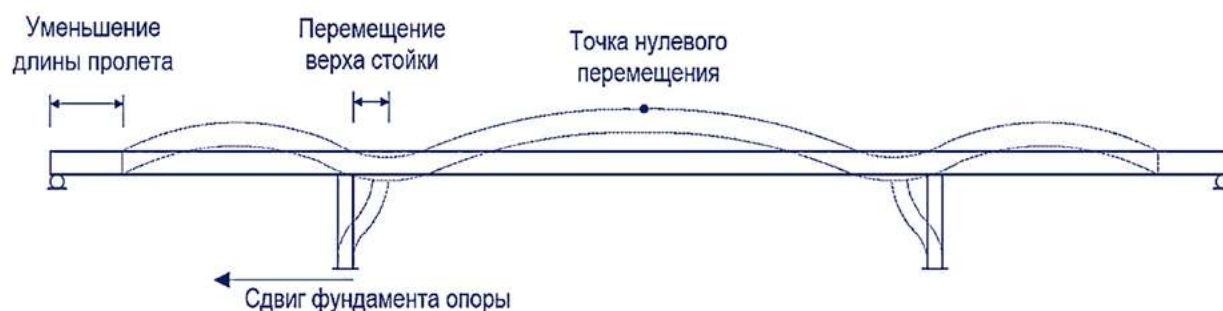


Рис. 1. Деформации неразрезного монолитного преднапряженного рамного моста под действием продольных сил ползучести и усадки

напряжений, образованию трещин и снижению эксплуатационной надежности конструкций.

Для оценки влияния таких долгосрочных деформаций было выполнено численное моделирование в программе Midas Civil.

Выбор сооружения для исследования

В качестве сооружения для создания расчетной модели выбран путепровод рамной конструкции из монолитного железобетона.

Пролетное строение, выполненное по схеме 30,0 + 38,0 + 42,2 + 38,0 + 30,0 м, — монолитное железобетонное плитно-ребристое неразрезное с предварительно напряженной арматурой.

Основные несущие элементы — 2 монолитные балки переменной ширины от 1300 до 1560 мм, высотой 2000 мм. Балки соединяются монолитной плитой проезжей части толщиной 250 мм. Поперечное расположение балок — на расстоянии 5500 мм. Материал пролетного строения — В40 F₁300 W12 ГОСТ 26633—2015.

Армирование балок принято напрягаемой арматурой, в качестве которой используются пучки из семипроволочных витых канатов Ø15,7 мм, площадью 150 мм² из стали класса 1860 ГОСТ Р 53772—2010 (К7-15.7-1860). Модуль упругости $E = 195\,000$ МПа. Коэффициент трения 0,2, коэффициент отклонения от теоретической оси 0,0016 1/пог. м. Пучки протягиваются в металлические гофрированные каналобразователи, внутренний диаметр кото-

рых — 100 мм. Усилие натяжения во всех пучках — 380 т.

Пролетное строение сооружается на сплошных подмостях. Подмости демонтируются после натяжения и инъектирования напрягаемой арматуры.

Общий вид сооружения приведен на рис. 2.

Параметры расчетной модели

Учитывая природу зависящих от времени свойств бетона, необходим сложный расчет для точного прогнозирования долгосрочных напряжений и деформаций, особенно в статически неопределимых предварительно напряженных мостах. Поэтому в данной работе расчет выполнен с использованием программного комплекса Midas Civil. Данное программное обеспечение позволяет проводить анализ МКЭ с учетом эффектов ползучести и усадки с использованием метода временных шагов. Таким образом возможно оценить напряжения и деформации в элементах предварительно напряженных железобетонных мостов на любом временном интервале.

Общий вид расчетной модели приведен на рис. 3.

Для описания развития усадки бетона во времени использована модель согласно [4, 5], учитывающая зависимость от относительной влажности окружающей среды (принята 73 %), модуля открытой поверхности и водоцементного состава бетона. Для моделирования усадки и ползучести

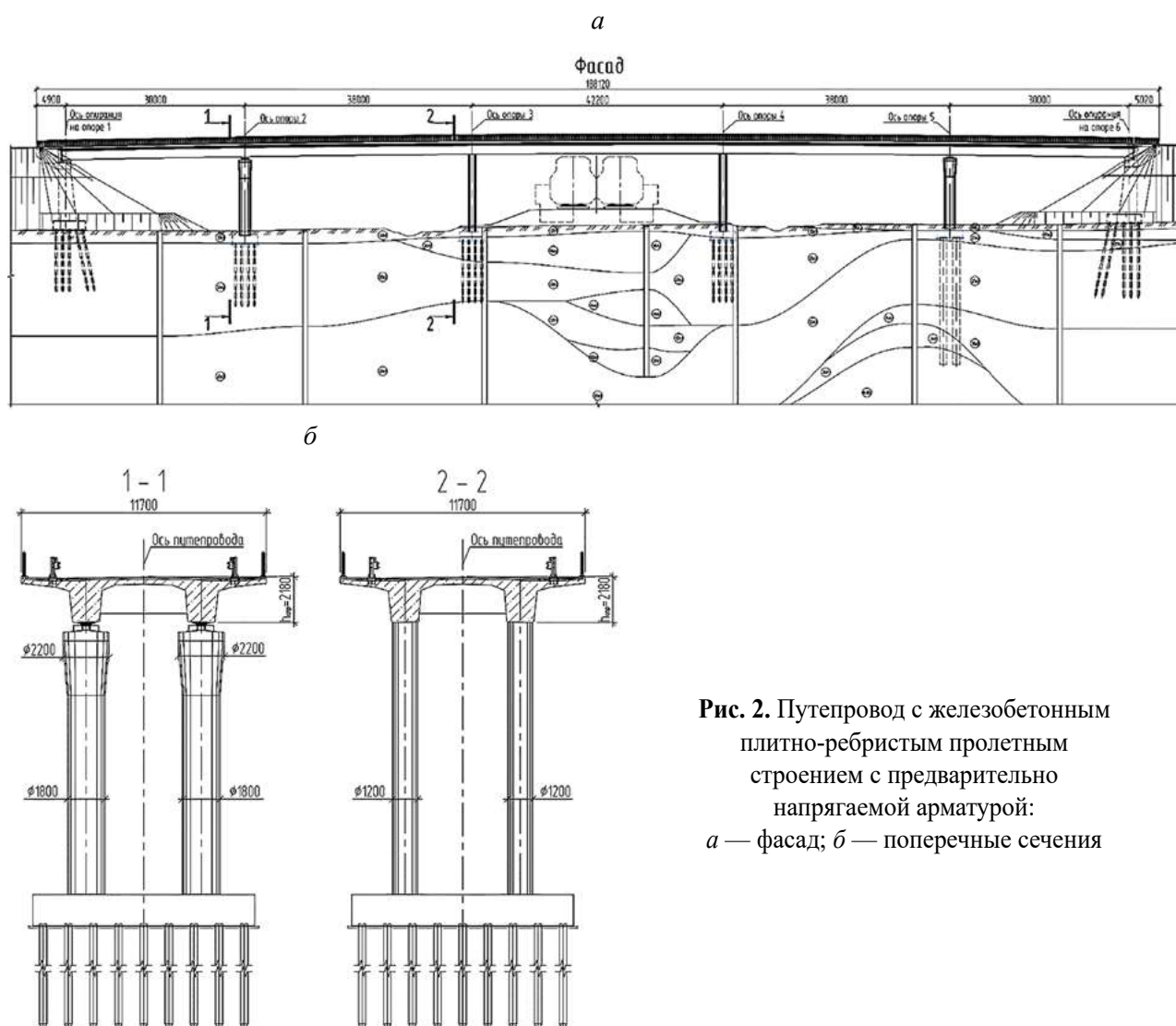


Рис. 2. Путепровод с железобетонным плитно-ребристым пролетным строением с предварительно напрягаемой арматурой:
а — фасад; *б* — поперечные сечения

бетона применена модель, соответствующая рекомендациям [5] и учитывающая возраст бетона в момент приложения нагрузки, длительности ее воздействия и условий твердения (рис. 4, б). Функция набора прочности бетоном задана в соответствии с [5] (рис. 4, в). Выбор данных моделей обусловлен их распространенностью в инженерной практике проектирования мостов [2, 4–6] и возможностями программного комплекса Midas Civil. Учет реологических свойств арматуры (релаксация напряжений) выполнен по модели [1] (рис. 4, а).

Расчетная модель выбранного сооружения выполнена в соответствии с проектными черте-

жами. При создании модели были назначены следующие допущения:

1. Модель создана без учета кривизны продольного профиля.
2. При зависящих от времени деформациях балки пролетного строения остаются упругими и без трещин.
3. Сдерживающее влияние ненапрягаемой арматуры балок пролета на усадку не учитывается.
4. В качестве внешних нагрузок приложены только собственный вес и сила предварительного напряжения.
5. Подвижные нагрузки и температурные воздействия в модели не учитывались.

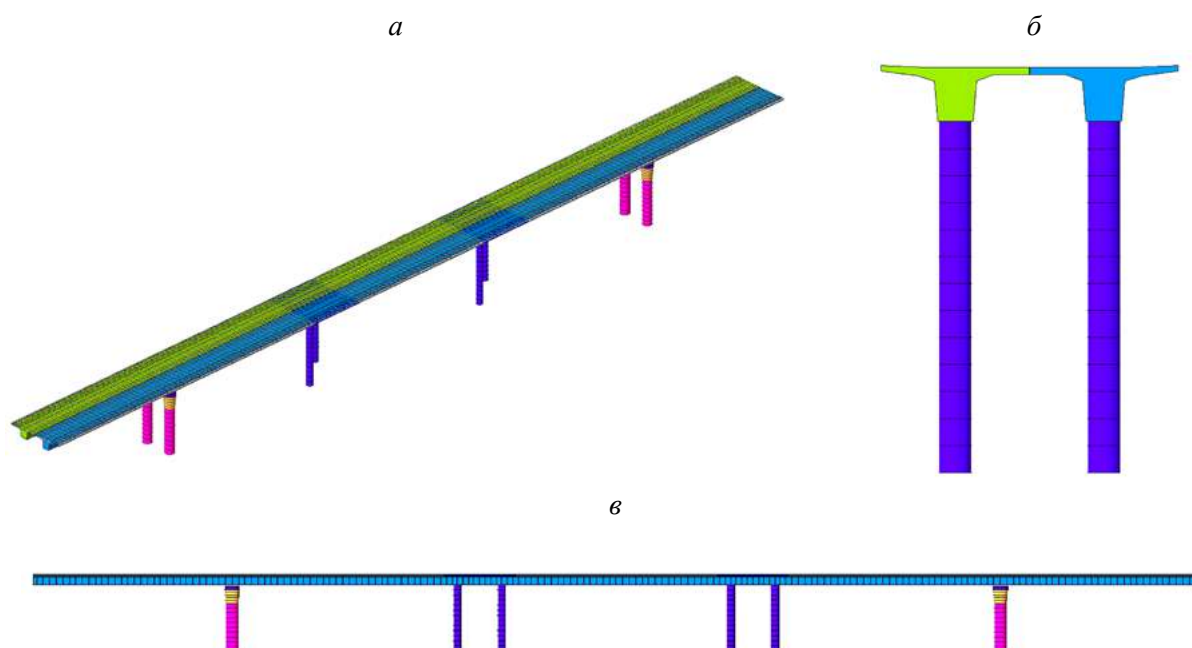


Рис. 3. Расчетная модель путепровода:
а — общий вид; б — поперечные сечения; в — фасад

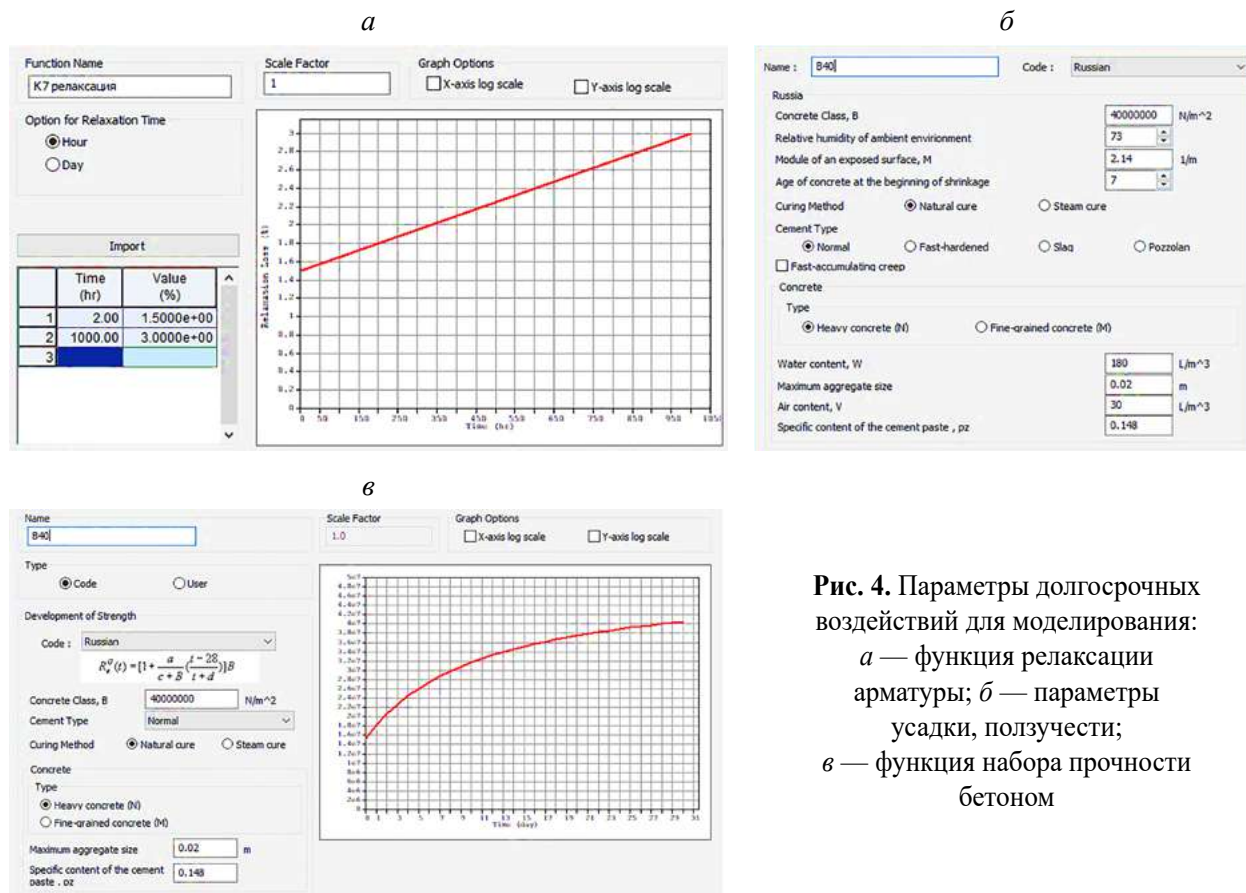


Рис. 4. Параметры долгосрочных воздействий для моделирования:
а — функция релаксации арматуры; б — параметры усадки, ползучести;
в — функция набора прочности бетоном

6. Для стоек опор предполагается линейно-упругое поведение.

7. В модели учтены зависящие от времени свойства высокопрочной арматуры (потери преднатяжения) и бетона (усадка, ползучесть).

8. Расчет выполнен на временной интервал до 30 лет.

9. Влияние температурно-влажностных градиентов по сечению элементов на развитие неравномерных усадочных деформаций и ползучести в рамках данной модели не учитывалось, что является предметом дальнейших исследований [8, 9].

Результаты расчета

По результатам расчета на рис. 5 показана деформированная форма сооружения вследствие воздействий предварительного напряжения, ползучести и усадки на временном интервале до 30 лет после завершения этапа строительства.

Для удобства восприятия результаты расчета представлены в виде графиков. Для стоек опор определены горизонтальные перемещения в уровне их верха (рис. 6) в зависимости от вре-

мени, а также перерезывающие силы (рис. 7, 9) и изгибающие моменты (рис. 8, 10). Анализ графиков показывает, что распределение усилий и перемещений по стойкам носит нелинейный характер, что согласуется с выводами других исследований о поведении статически неопределимых систем при реологических воздействиях [9, 10].

Для балок пролетного строения оценена скорость развития деформаций укорочения, соответствующая перемещениям на торцах пролета (рис. 11). Наблюдаемое на графике укорочение пролетного строения в первый год эксплуатации (до 70 % от общего) подчеркивает важность учета этих процессов уже на стадии строительства и начала эксплуатации [2, 11].

Помимо продольных деформаций, существенное значение для эксплуатационных качеств моста, в частности плавности проезда, имеют вертикальные прогибы пролетного строения. На рис. 12 представлена динамика изменения вертикального прогиба в середине центрального пролета (42,2 м) на протяжении 30 лет. Анализ показывает, что наибольшая интенсивность

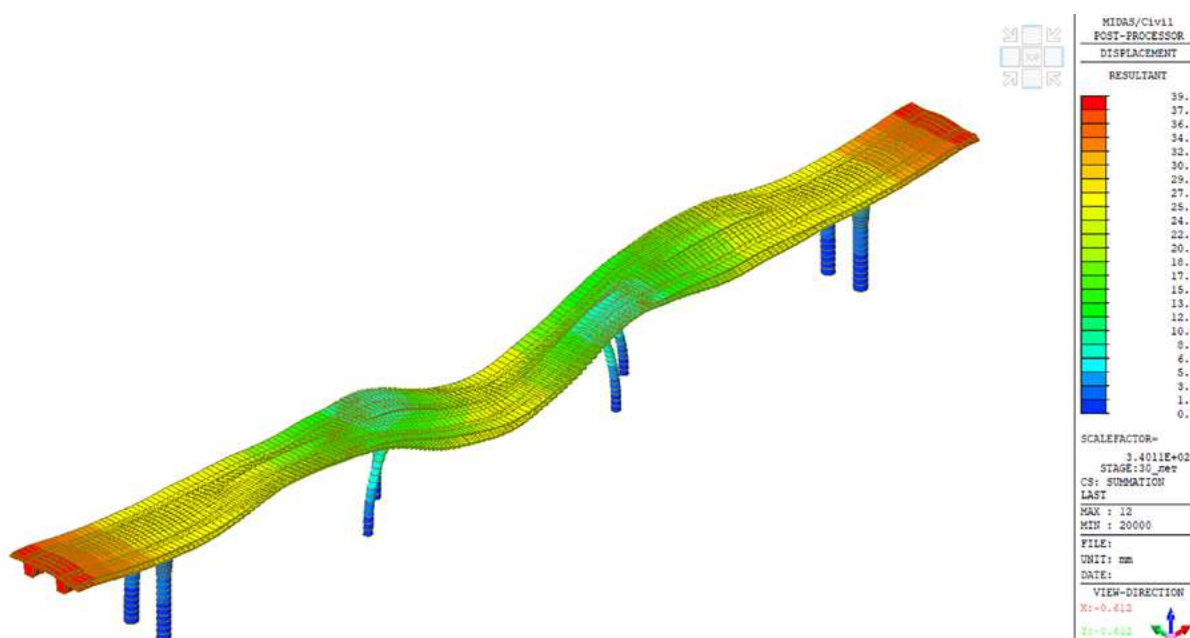


Рис. 5. Деформированная форма путепровода

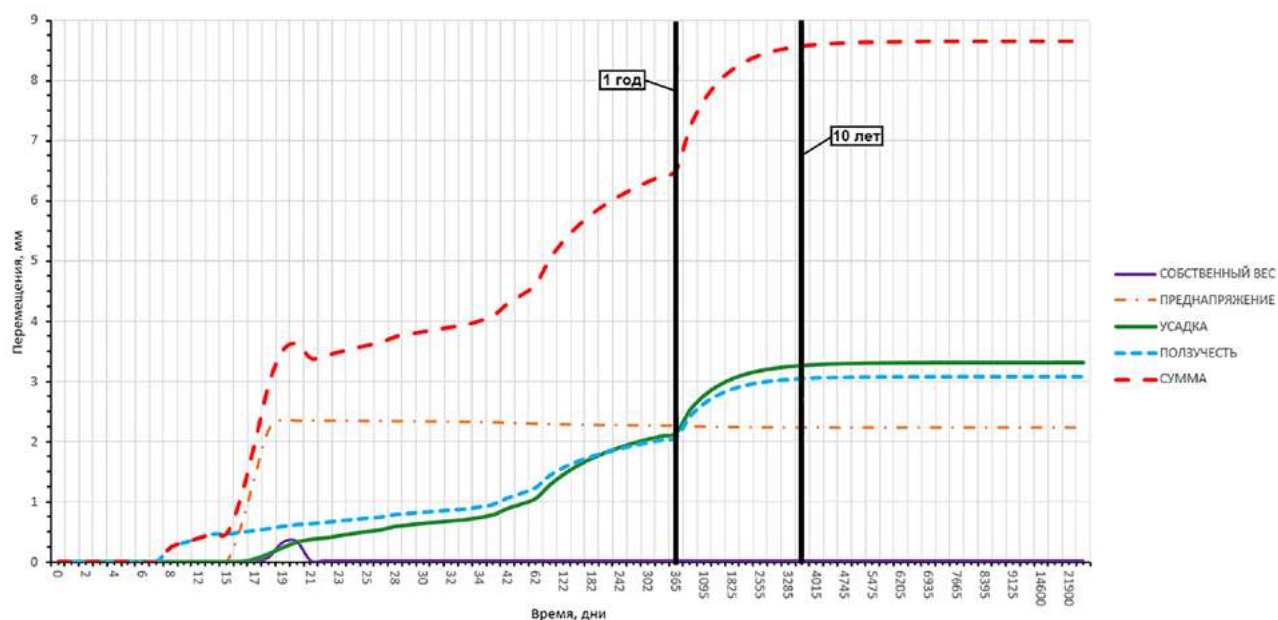


Рис. 6. Перемещения верха стойки, мм

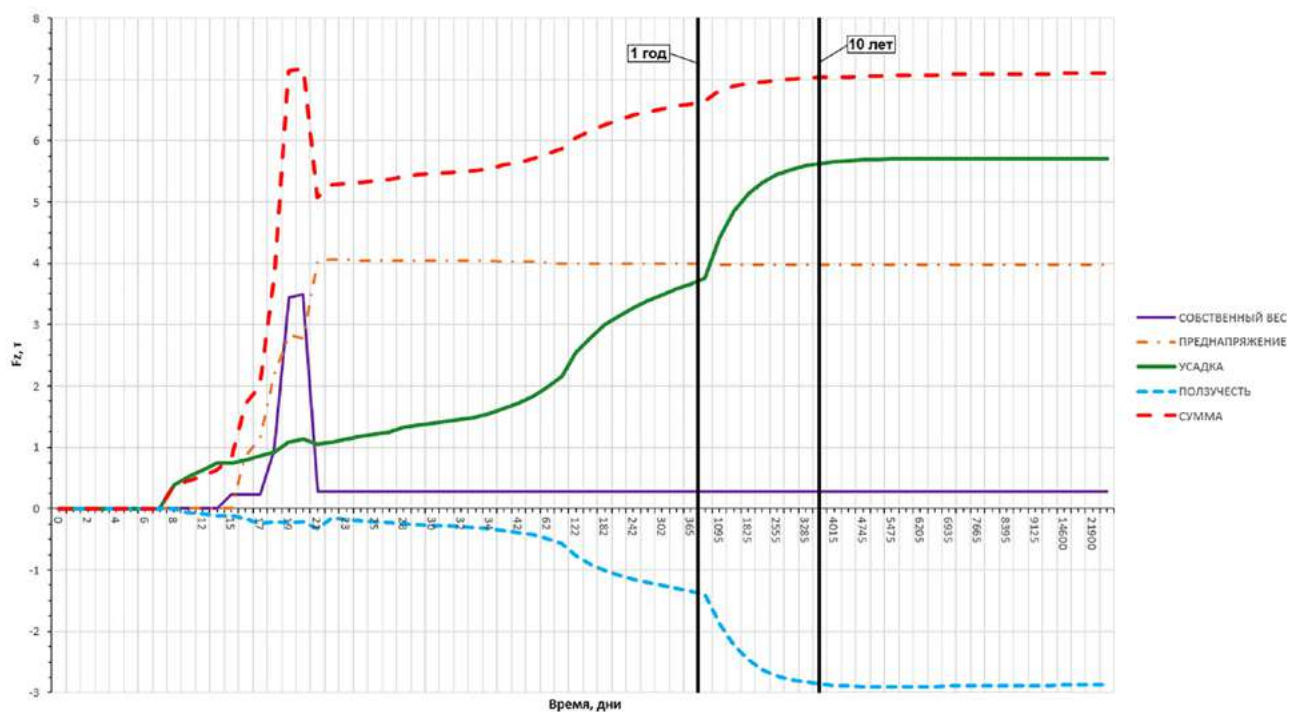


Рис. 7. Перерезывающая сила в уровне верха стойки, т

нарастания прогиба наблюдается в первый год после ввода сооружения в эксплуатацию (до 70 % от общего), после чего скорость нарастания деформаций существенно снижается и выходит на плато после 10 лет.

Обсуждение результатов

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Усадка бетона пролетного строения вносит наибольший вклад в деформации узла стойки

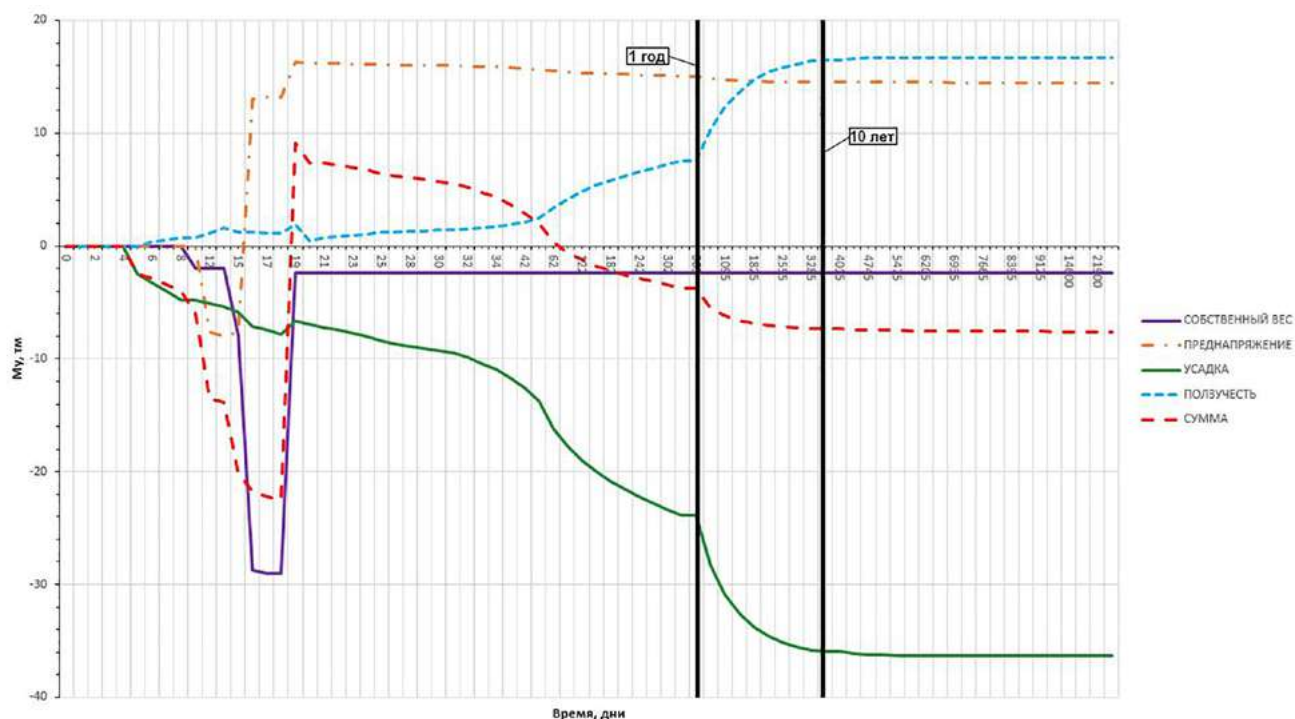


Рис. 8. Изгибающий момент в уровне верха стойки, тм

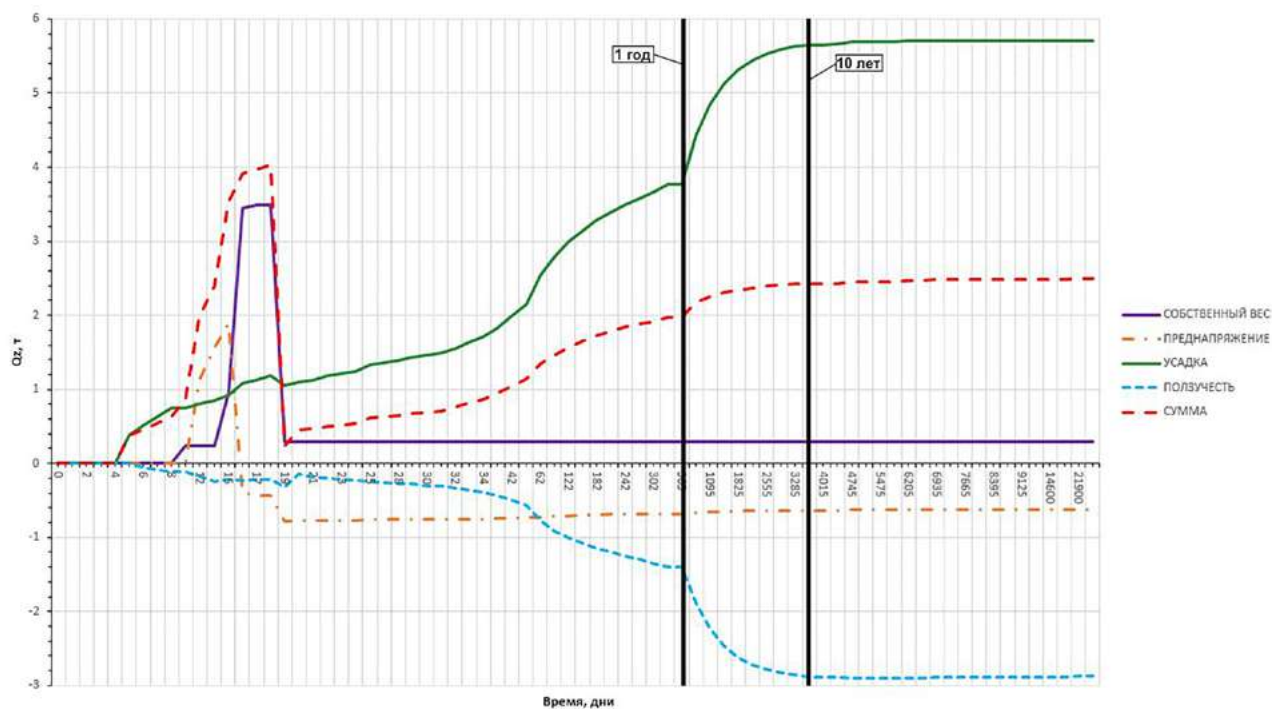


Рис. 9. Перерезывающая сила в уровне низа стойки, т

и величину перерезывающей силы в сравнении с другими компонентами, особенно в первый год после бетонирования, когда интенсивность усадки максимальна [1, 6, 7]. Это подтверждает

важность контроля условий твердения на ранних стадиях.

2. Эффект вторичной ползучести воздействует в направлении, противоположном

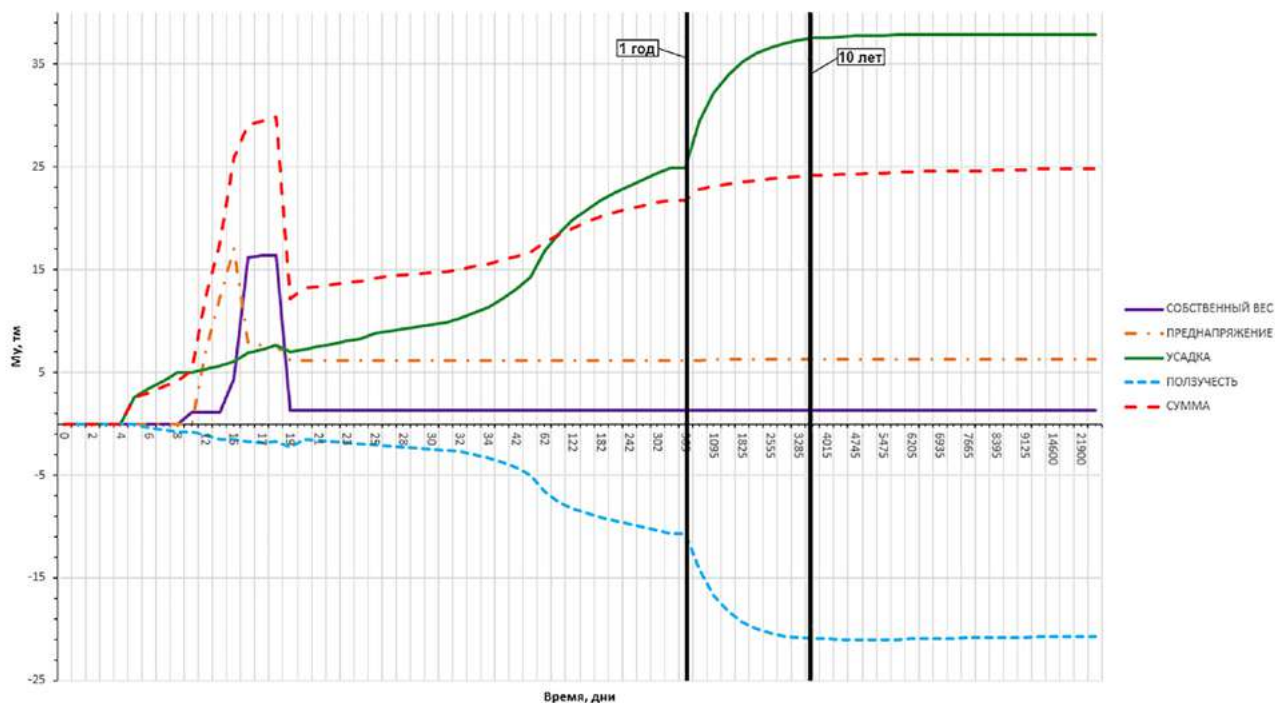


Рис. 10. Изгибающий момент в уровне низа стойки, тм

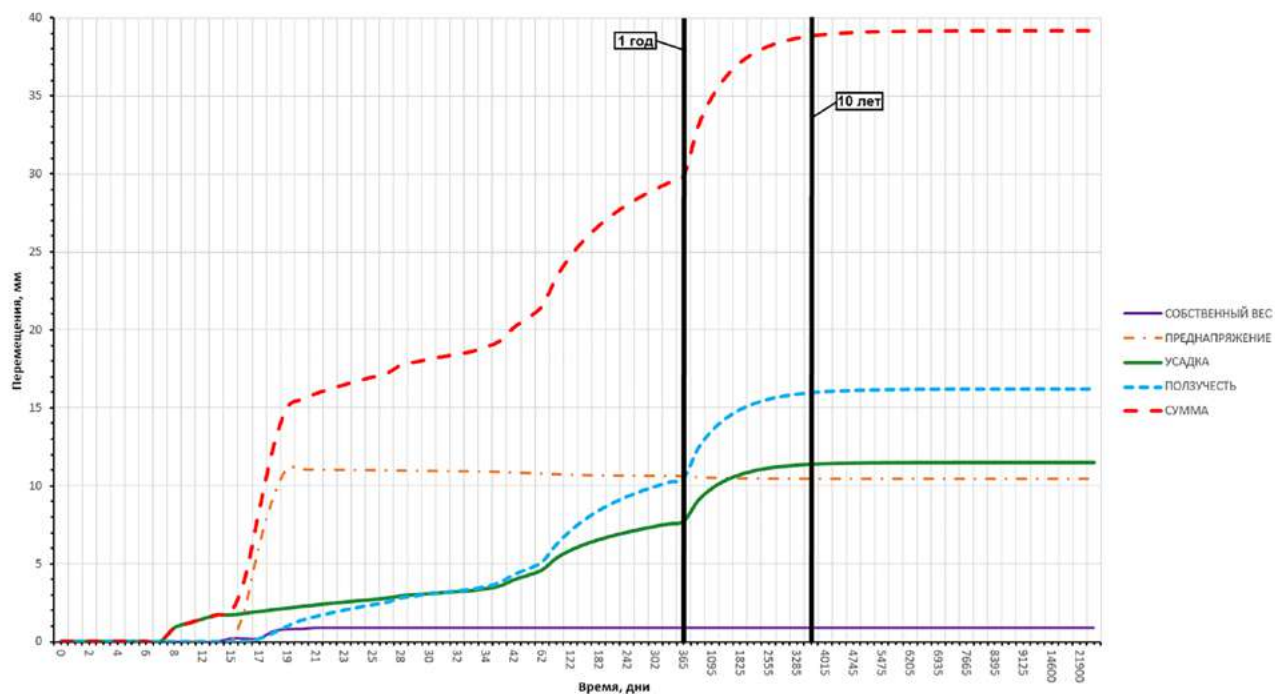


Рис. 11. Уменьшение длины пролета, мм

эффекту вторичной усадки, выполняя роль своеобразной релаксации системы. Более того, ползучесть значительно уменьшает усилия в стойке, вызванные ее деформацией от усадки и преднапряжения. Этот компенсирующий

эффект ползучести, составляющий примерно 25–40% от пиковых напряжений, вызванных усадкой, хорошо известен [9, 12], однако его количественная оценка для узла данного типа была проведена впервые.

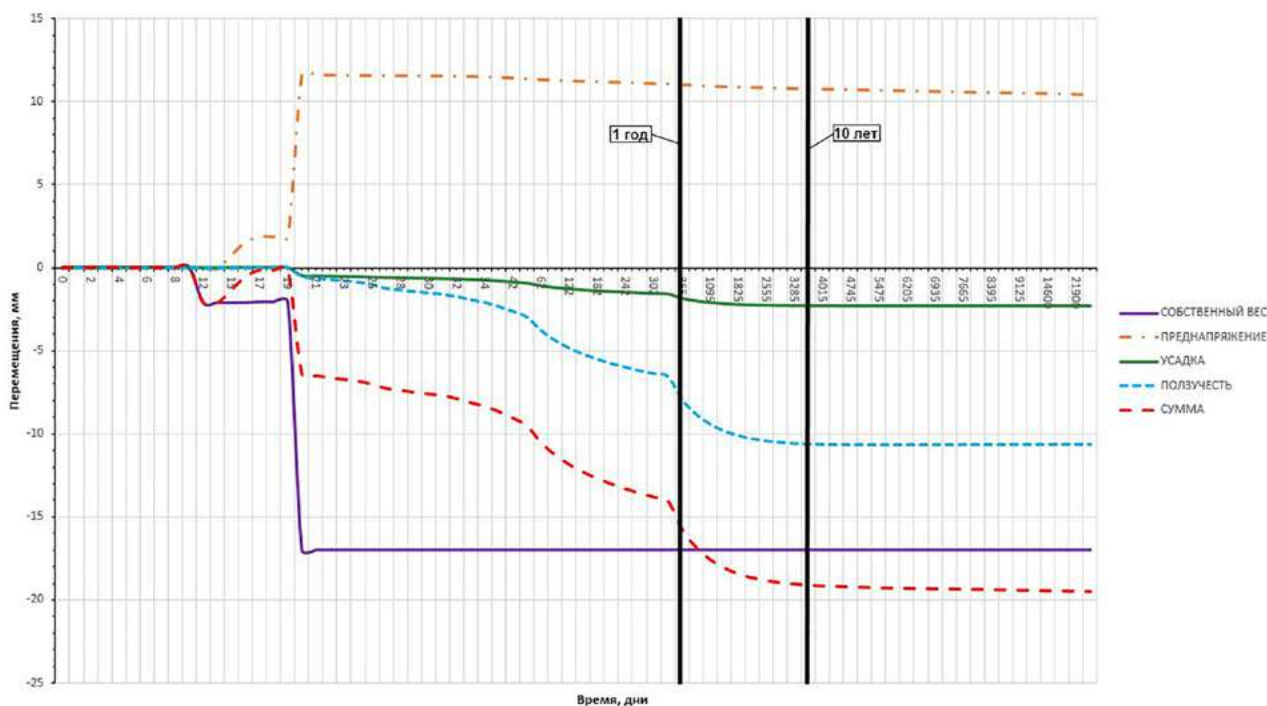


Рис. 12. Вертикальный прогиб в середине центрального пролета, мм

3. Наибольшее укорочение пролета вызвано эффектом ползучести бетона.

4. Как правило, чем дальше находится стойка опоры от точки нулевых перемещений (середина пролета), тем большее воздействие на нее оказывается за счет уменьшения длины пролета.

5. Наибольшие деформации и изменения усилий происходят на протяжении первого года (до 60–80 % от конечных за 30 лет), с выходом на стадию стабилизации в последующие 10 лет. Такая динамика соответствует общим законам развития реологических деформаций бетона [1, 6, 7], но подчеркивает, что период активных изменений напряженно-деформированного состояния конструкции значительно короче расчетного срока службы, что важно для планирования мониторинга.

6. Полученные значения дополнительных усилий в стойках и деформаций пролетного строения превышают оценки, даваемые упрощенными методами некоторых нормативных документов [2, 6] для схожих пролетов. Это указывает

на необходимость использования пространственного нелинейного анализа с детальным учетом реологии, как рекомендовано в [1, 11], не только для узла объединения, но и для оценки воздействия на тело опоры и фундамент.

7. Развитие вертикальных прогибов в середине пролета (рис. 12) является следствием комплексного воздействия: релаксации усилий в предварительно напряженной арматуре, снижающей эффект выгиба; ползучести бетона под действием постоянных нагрузок, приводящей к дополнительному прогибу; и усадки, которая, будучи стесненной арматурой и неоднородной по сечению, также вносит вклад в вертикальные деформации. Наибольший вклад в увеличение прогиба со временем вносит ползучесть бетона под действием изгибающих моментов от постоянных нагрузок. Учитывая, что до 70 % долгосрочного прогиба реализуется уже в первый год эксплуатации (рис. 12), меры по его компенсации должны закладываться на стадии проектирования и строительства. Для минимизации долгосроч-

ных прогибов и обеспечения плавности проезда в течение всего срока службы рекомендуется:

- Увеличивать начальный строительный подъем (монтажный выгиб) пролетного строения на величину, превосходящую прогнозируемый суммарный долгосрочный прогиб (включая влияние ползучести, усадки, релаксации и частично временных нагрузок). Величина строительного подъема должна определяться на основе детального нелинейного анализа с учетом реальных сроков приложения нагрузок и реологических свойств бетона.

- Применять схемы преднапряжения, обеспечивающие не только прочность, но и требуемую жесткость на длительном временном периоде, возможно, с использованием дополнительного преднапряжения или регулирования натяжения на стадии эксплуатации для активного управления прогибом.

8. При проектировании тел опор и фундаментов рамных мостов следует учитывать дополнительные изгибающие моменты и перерезывающие силы, возникающие от стесненных деформаций ползучести и усадки пролетного строения в течение всего срока службы, особенно в первые годы эксплуатации (рис. 7–10). Помимо учета этих усилий в расчетах на прочность и устойчивость, следует:

- Повышать жесткость сечений стоек в плоскости рамы и/или использовать более мощные фундаменты (уширенные подошвы, свайные ростверки с большей жесткостью на горизонтальную нагрузку) для восприятия возникающих моментов и уменьшения кренов.

- Тщательно моделировать взаимодействие конструкции с основанием (особенно при свайных фундаментах) с учетом возможного изменения жесткости системы «опора — фундамент — основание» во времени под влиянием длительных нагрузок.

- Рассматривать конструктивные меры для снижения влияния долгосрочных деформаций на опоры.

Заключение

Данная работа позволила оценить влияние ползучести и усадки бетона на напряженно-деформированное состояние узла жесткого объединения стойки и пролетного строения рамных мостов. На основе численного моделирования установлено, что усадка бетона является основным фактором на ранних стадиях эксплуатации, вызывая значительные продольные деформации и усилия в узле. Ползучесть бетона частично компенсирует эти напряжения, снижая риск образования трещин. Наибольшие изменения усилий в стойке и вертикальных прогибов в середине пролета (до 70 % от 30-летних значений) наблюдаются в течение первого года эксплуатации, после чего процесс стабилизируется. Дополнительные изгибающие моменты и перерезывающие силы, передаваемые на тело опоры и фундамент от стесненных длительных деформаций пролетного строения, следует учитывать при проектировании этих элементов.

Полученные результаты подтверждают необходимость учета долгосрочных деформаций при проектировании рамных мостов с использованием современных вычислительных комплексов, реализующих нелинейные модели ползучести и усадки [1, 5, 7, 11]. Особое внимание должно уделяться прогнозированию вертикальных прогибов пролетного строения для обеспечения плавности проезда и корректной оценке воздействий на опоры и их фундаменты. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на учет влияния трещинообразования, нелинейного поведения бетона при длительном нагружении, а также точное моделирование этапов возведения и натяжения арматуры [8, 9, 12]. Это позволит повысить точность прогнозирования поведения конструкций, минимизировать остаточные напряжения, предотвратить чрезмерные прогибы и крены опор и увеличить срок их службы.

Список источников

1. ACI Committee 209. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209.2R-08) / ACI Committee 209. — Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2008. — Pp. 249–260.
 2. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications: 5th edition / American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). — Washington, DC: AASHTO, 2010.
 3. Колмогоров А. Г. Расчет железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам / А. Г. Колмогоров. — Томск: Печатная мануфактура, 2009. — 496 с.
 4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03—84. — М.: Стандартинформ, 2019.
 5. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1988.
 6. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures / European Committee for Standardization. — Brussels, 2004.
 7. Bazant Z. P. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures — model B3 / Z. P. Bazant, S. Baweja // *Materials and Structures*. — 1995. — Vol. 28. — Pp. 357–365. — DOI: 10.1007/BF02473152.
 8. Gilbert R. I. Time effects in concrete structures / R. I. Gilbert. — Amsterdam: Elsevier. *Developments in civil engineering*. 1988. — Vol. 23. — 321 p.
 9. Ghali A. Concrete structures: Stresses and deformations / A. Ghali, R. Favre, M. Elbadry. — 4th ed. — CRC Press, 2012. — DOI: 10.1201/9781003061274.
 10. Neville A. M. Creep of plain and structural concrete / A. M. Neville, W. H. Dilger, J. J. Brooks. — Construction Press, 1983.
 11. Dilger W. H. Creep analysis of prestressed concrete structures using creep-transformed section properties / W. H. Dilger // *PCI Journal*. — 1982. — Vol. 27. — Iss. 1. — Pp. 98–118. — DOI: 10.15554/pci.01011982.98.119.
 12. Wendner R. Optimization method, choice of form and uncertainty quantification of Model B4 using laboratory and multi-decade bridge databases / R. Wendner, M. H. Hubler, Z. P. Bazant // *Materials and Structures*. — 2015. — Vol. 48. — Iss. 4. — Pp. 771–796. — DOI: 10.1617/s11527-014-0515-0.
- Дата поступления: 19.08.2025
Решение о публикации: 10.09.2025

Контактная информация:

АВХИМОВИЧ Роман Александрович — аспирант кафедры «Мосты»; avkhimovich777@ya.ru
ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Мосты»; sergchizh@yandex.ru

Stress Assessment of the Column-Superstructure Joint in a Reinforced Concrete Frame Bridge Under Creep and Shrinkage Deformations**R. A. Avkhimovich, S. V. Chizhov**

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

For citation: Avkhimovich R. A., Chizhov S. V. Stress Assessment of the Column-Superstructure Joint in a Reinforced Concrete Frame Bridge Under Creep and Shrinkage Deformations // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1013–1024. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1013-1024

Summary

Purpose: To evaluate the impact of long-term deformations caused by concrete creep and shrinkage on the stress-strain state of the rigid column-superstructure joint in a frame bridge. To verify the applicability of modern creep and shrinkage models for this type of structure. **Methods:** The numerical modelling was performed using the Finite Element Method (FEM) in the Midas Civil software. Nonlinear long-term effects of concrete creep and shrinkage, as well as prestress losses in the reinforcement, were considered. **Results:** It was established that concrete shrinkage exerts the most significant influence on longitudinal deformations and on forces in the joints during the early service stage. Concrete creep partially compensates for the stresses induced by shrinkage. The most significant changes in forces occur within the first year of service; thereafter, the rate of change decreases substantially. The research results have confirmed the necessity of accurately accounting for long-term deformations in design. **Practical significance:** The presented results will enable a more accurate prediction of the rigid column-superstructure joint behavior in frame bridges, thereby reducing the risk of crack formation and elevated residual stresses. This will contribute to enhanced reliability and durability of bridge structures.

Keywords: Prestressed concrete, bridge, prediction of long-term concrete deformations, shrinkage, creep, frame bridges.

References

1. ACI Committee 209. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209.2R-08). American Concrete Institute, 2008, pp. 249–260.
2. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications: 5th edition. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2010.
3. Kolmogorov A.G. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy po rossiyskim i zarubezhnym normam* [Calculation of reinforced concrete structures according to Russian and foreign standards]. Tomsk: Pechatnaya manufaktura Publ., 2009, 496 p. (In Russian)
4. SP 35.13330.2011. *Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.05.03—84* [Bridges and pipes. Updated edition of SNIp 2.05.03—84]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian)
5. *Rekomendatsii po uchetu polzuchesti i usadki betona pri raschete betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy* [Recommendations for accounting for creep and shrinkage of concrete when calculating concrete and reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1988. (In Russian)
6. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. European Committee for Standardization, 2004.
7. Bazant Z. P., Baweja S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures — model B3. *Materials and Structures*, 1995, vol. 28, pp. 357–365. DOI: 10.1007/BF02473152.
8. Gilbert R. I. Time effects in concrete structures. *Developments in civil engineering*, vol. 23. Elsevier, 1988, 321 p.
9. Ghali A., Favre R., Elbadry M. *Concrete structures: Stresses and deformations*. CRC Press, 2012. DOI: 10.1201/9781003061274.
10. Neville A. M., Dilger W. H., Brooks J. J. *Creep of plain and structural concrete*. Construction Press, 1983.
11. Dilger W. H. Creep analysis of prestressed concrete structures using creep-transformed section properties. *PCI Journal*, 1982, vol. 27, iss. 1, pp. 98–118. DOI: 10.15554/pci.01011982.98.119.
12. Wendner R., Hubler M. H., Bažant Z. P. Optimization method, choice of form and uncertainty quantification of Model B4 using laboratory and multi-decade bridge databases. *Materials and Structures*, 2015, vol. 48, iss. 4, pp. 771–796. DOI: 10.1617/s11527-014-0515-0.

Received: August 19, 2025

Accepted: September 10, 2025

Author's information:

Roman A. AVKHIMOVICH — Postgraduate Student, “Bridges” Department; avkhimovich777@ya.ru
Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the “Bridges” Department; sergchizh@yandex.ru

УДК 624.016

Инновационные конструкции каркасов промышленных зданий

В. В. Веселов

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

Для цитирования: Веселов В. В. Инновационные конструкции каркасов промышленных зданий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1025–1034. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1025-1034

Аннотация

Цель: Выполнить анализ использования комбинированных сталебетонных конструкций в каркасах одноэтажных промышленных зданий, в том числе на транспорте, исследовать возможное снижение материалоемкости и стоимости предлагаемой инновационной комбинированной конструкции каркаса здания при повышении жесткости и надежности. **Методы:** Анализ комбинированных конструкций известных конструктивных решений, расчет нескольких вариантов каркасов с привлечением расчетных программных комплексов по действующим методикам. **Результаты:** Традиционные конструкции каркасов промышленных зданий с применением металлических конструкций не всегда обладают достаточной жесткостью, стойкостью к прогрессирующему обрушению, претерпевают различные повреждения от силовых, механических, а также особых нагрузок и воздействий, особенно на транспорте. Для каркасов промышленных зданий с большими пролетами, как правило, дополнительно требуется применение конструктивных мероприятий против возможного прогрессирующего обрушения. На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС ведутся разработки перспективных конструктивных решений для каркасов зданий и их элементов, отличающихся повышенной жесткостью, несущей способностью и надежностью. Предложена инновационная конструкция каркаса промышленного здания повышенной жесткости, которая включает колонны, стропильные фермы, подкрановые балки, а также систему связей, покрытие и стеновые панели. Покрытие выполнено из ребристых железобетонных плит с замоноличенными бетоном швами, опорные поперечные ребра которых жестко соединены сварными швами с верхним поясом стропильных ферм, стеновые панели выполнены из железобетонных плит с замоноличенными бетоном швами, опорные поперечные ребра которых жестко соединены сварными швами с наружной поверхностью колонн. Выполнен расчет нескольких вариантов каркаса промышленного здания, установлена величина снижения веса конструкции, ее стоимости, повышения жесткости инновационного конструктивного решения. **Практическая значимость:** Подтверждены основные преимущества комбинированных сталебетонных конструкций в каркасах одноэтажных промышленных зданий. Инновационная конструкция каркаса демонстрирует снижение массы на 18 %, стоимости — на 25 % и повышение жесткости на 35 % по сравнению с традиционными металлическими каркасами. Предлагаемое решение перспективно для промышленных зданий с большими пролетами, в том числе объектов транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: Одноэтажные здания, промышленные здания, каркас, металлические конструкции, комбинированные конструкции, сталебетон, особые нагрузки, несущая способность, жесткость, прогрессирующее обрушение.

Введение

Одноэтажные промышленные (производственные) здания транспортных зданий и сооружений проектируют в большинстве случаев классов КС-2 и КС-3, что вызывает дополнительные требования к конструированию каркасов таких зданий [1].

Металлические каркасы производственных зданий на транспорте часто подвержены большим деформациям от механических, силовых и других воздействий, претерпевают потерю местной и общей устойчивости, коррозию и другие повреждения, вплоть до прогрессирующего обрушения от особых нагрузок и воздействий [2], вызванных в том числе неграмотной эксплуатацией объекта [3].

Для каркасов производственных зданий с пролетами от 30 м, как для большепролетных, дополнительно требуется применение конструктивных мероприятий для повышения надежности и предотвращения возможного прогрессирующего обрушения [4]. Для решения данной проблемы используют, как правило, общеизвестные приемы, рекомендуемые нормами. Например, рационально применять в каркасах зданий пространственные металлические конструкции, использовать в элементах каркаса гибридные или комбинированные конструкции с применением стали, бетона, композитов [5–7], что позволяет также уменьшать размеры поперечного сечения элементов при экономии расхода стали металлического каркаса здания [8]. Для восприятия аварийных нагрузок нормы рекомендуют также использовать подстропильные балки, фермы по неразрезной схеме и расчетные вертикальные связи между фермами покрытия, которые должны быть расположены по всей длине здания в нескольких зонах [9].

В практике проектирования современных зданий иногда встречаются инновационные конструктивные решения каркасов с повышенной

жесткостью. Так, например, известны конструктивные средства увеличения пространственной жесткости одноэтажных производственных зданий [10], включающие металлический каркас с рамами, систему вертикальных и горизонтальных связей, диафрагмы жесткости в виде стеновых железобетонных панелей. При этом верхняя часть ступенчатой колонны каркаса имеет повышенную жесткость за счет увеличения поперечного сечения; покрытие здания имеет повышенную жесткость при его работе в горизонтальной плоскости за счет неразрезной схемы железобетонных плит покрытия, устройства шпонок между плитами; а в деформационных швах покрытия выполнены горизонтальные связи в виде металлических податливых стержней [10].

Недостатком конструктивных средств увеличения пространственной жесткости одноэтажных производственных зданий [10] и аналогичных ему конструктивных решений является увеличенная материалоемкость, а иногда и трудоемкость изготовления по причине большого расхода металла на несущие элементы каркаса, так как ограждающие конструкции не включаются в надежную совместную работу с ними и не учитываются в расчете каркаса.

Простым и часто неиспользуемым на практике конструктивным приемом является вовлечение в совместную работу с каркасом здания его ограждающих элементов — стеновых панелей и плит покрытия. Такой конструктивный прием может быть весьма эффективен, в частности при возведении стен и плит из железобетона [11].

На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС ведутся разработки перспективных конструктивных решений каркасов зданий и их элементов, обладающих повышенной жесткостью, несущей способностью и надежностью при минимизации материалоемкости и трудоемкости изготовления [12–17].

Практическое применение и результаты

Предлагается инновационная конструкция каркаса одноэтажного производственного здания (рис. 1), защищенная патентом на изобретение [18].

Предлагаемая инновационная конструкция металлического каркаса одноэтажного производственного здания повышенной жесткости включает:

– стальные ступенчатые колонны;

– опирающиеся на них стальные фермы покрытия;

– стальные подкрановые балки для мостовых кранов;

– систему вертикальных и горизонтальных связей между колоннами и фермами;

– железобетонные плиты покрытия;

– железобетонные панели стен.

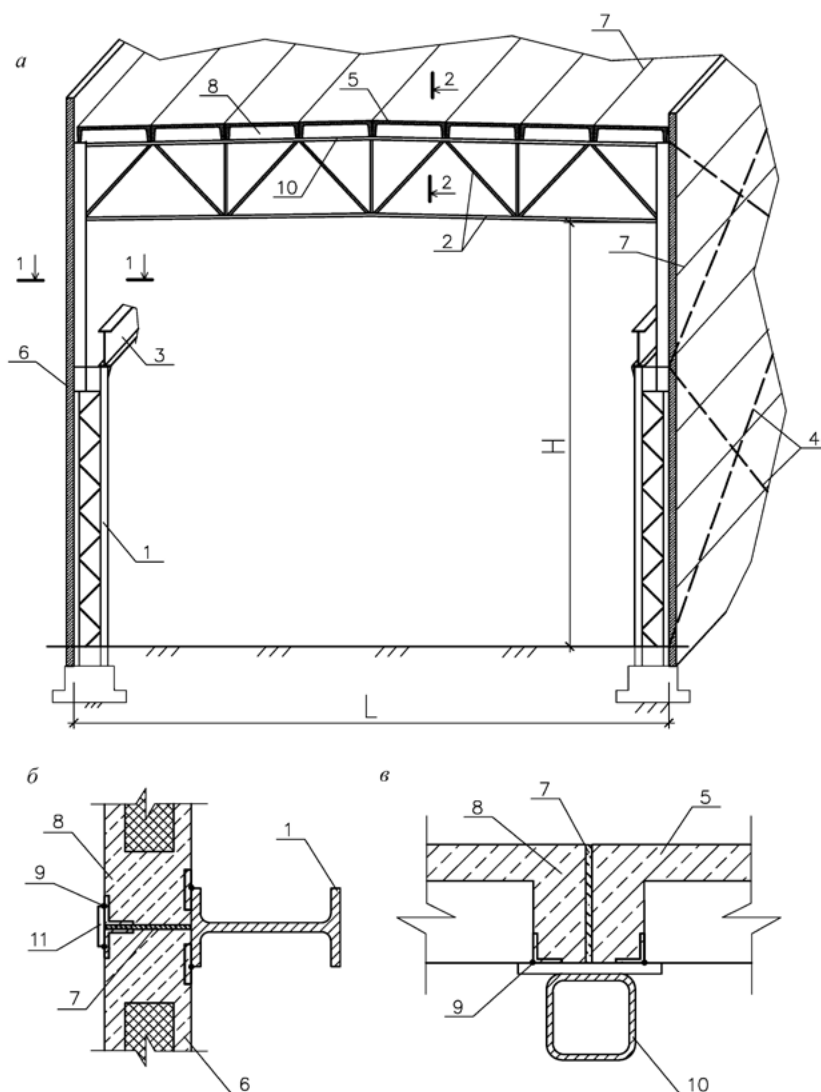


Рис. 1. Общий вид металлического каркаса одноэтажного производственного здания повышенной жесткости:

а — общий вид, *б* — сечение 1–1, *в* — сечение 2–2: 1 — металлические колонны; 2 — фермы покрытия; 3 — подкрановые балки; 4 — вертикальные связи; 5 — плиты покрытия; 6 — стеновые панели; 7 — швы омоноличивания; 8 — опорные ребра; 9 — сварные швы; 10 — верхний пояс стропильных ферм; 11 — соединительные накладки

При этом:

- швы между плитами покрытия замоноличены бетоном класса В30 и выше;
- опорные поперечные ребра плит, обладающие увеличенной несущей способностью, прикреплены расчетными сварными швами к поясам ферм покрытия;
- швы между панелями стен также замоноличены бетоном класса В30 и выше;
- опорные поперечные ребра панелей, имеющие увеличенную несущую способность, прикреплены расчетными сварными швами к поверхностям ступенчатых колонн.

Кроме того, железобетонные стеновые панели жестко связаны между собой на колоннах расчетными сварными швами через закладные детали с использованием накладок.

В предложенном конструктивном решении железобетонные плиты покрытия включаются в совместную работу на сжатие с верхним поясом стальных ферм покрытия. Это обеспечивает:

- повышение вертикальной и горизонтальной жесткости покрытия при действии расчетных нагрузок и воздействий;
- снижение нормальных усилий в поясах ферм покрытия, что ведет к уменьшению расхода стали в элементах каркаса одноэтажного производственного здания.

Аналогичным образом железобетонные панели стен включаются в совместную работу на сжатие со стальными колоннами каркаса. Данный подход позволяет:

- увеличить вертикальную и горизонтальную жесткость колонн при действии расчетных нагрузок и воздействий;
- снизить нормальные усилия в колоннах, что также способствует уменьшению расхода стали в элементах каркаса одноэтажного производственного здания.

Жесткое соединение железобетонных стеновых панелей с колоннами каркаса увеличивает

горизонтальную жесткость колонн при действии расчетных нагрузок и воздействий, уменьшает изгибные усилия в колоннах, что приводит к уменьшению расхода стали на элементы каркаса одноэтажного производственного здания.

Повышенная несущая способность опорных ребер железобетонных плит покрытия и стеновых панелей достигается за счет дополнительного армирования или увеличения размеров их поперечного сечения, что устанавливается расчетом при проектировании.

Для оценки эффективности предлагаемого инновационного конструктивного решения было сформировано 2 варианта поперечных рам каркаса производственного здания:

- металлическая рама со ступенчатыми колоннами и стропильными фермами;
- комбинированная металлическая рама с жестко прикрепленными железобетонными плитами покрытия и стеновыми панелями.

Расчет каркасов был выполнен с привлечением проектно-вычислительного комплекса SCAD Office по действующим нормативным документам для стальных и сталежелезобетонных конструкций [19, 20].

В качестве исходных данных приняты параметры: пролет — 36 м, длина — 76 м, высота — 21 м, шаг колонн — 6 м, мостовой кран — 200 тс, месторасположение — г. Волосово Ленинградской обл.

Колонны каркаса — стальные, ступенчатые, сквозного сечения в подкрановой части (ПЧК), $h = 1$ м, и сплошного сечения в надкрановой части (НЧК), $h = 0,5$ м, из прокатных двутавров по ГОСТ Р 57837—2017; стропильные фермы — стальные, трапециевидные с треугольной решеткой, из профильных труб по ГОСТ 32931—2015, высотой на опоре 2,2 м и в середине пролета 3,37 м; нижний пояс (НПФ) — из квадратной трубы, верхний пояс (ВПФ) — из прямоугольной трубы, решетка (РФ) — из квадратных труб.

Во 2-м варианте каркаса в расчетной схеме, помимо металлических элементов, заданы железобетонные ребра плит покрытия и стеновых панелей, жестко прикрепленные к поверхностям верхних поясов стропильных ферм и колонн соответственно (рис. 1), то есть конструкция рассматривается как сталебетонная. Железобетонные плиты при этом могут быть применены типовыми по известным сериям, а жесткое прикрепление плит к фермам обеспечивается сварными швами

по всем опорным площадкам с последующим моноличиванием швов между плитами (рис. 1).

В результате выполненных расчетов (таблица, рис. 2) выявлено:

- инновационная конструкция металлического каркаса производственного здания по сравнению с традиционными конструкциями металлических каркасов позволяет сэкономить 18 % расхода стали;
- инновационная конструкция металлического каркаса производственного здания по сравнению

Сравнение вариантов рам каркаса одноэтажного промышленного здания

Тип конструкции	Сечения элементов	Расход стали, кг (%)	Примерная стоимость в деле, тыс. руб.	Деформации, мм (%)
Металлическая рама	ВЧК — двутавр 40Ш2, НЧК — 2 двутавра 60Б2, ВПФ — $260 \times 240 \times 6$ мм, НПФ — 200×7 мм, РФ — 180×7 и 140×5 мм	200	442 (100)	122 (100)
Комбинированная рама	ВЧК — двутавр 40Ш1, НЧК — 2 двутавра 60Б2, ВПФ — $140 \times 100 \times 5$ мм, НПФ — 180×7 мм, РФ — 180×6 и 140×5 мм	65	343 (75)	79 (65)

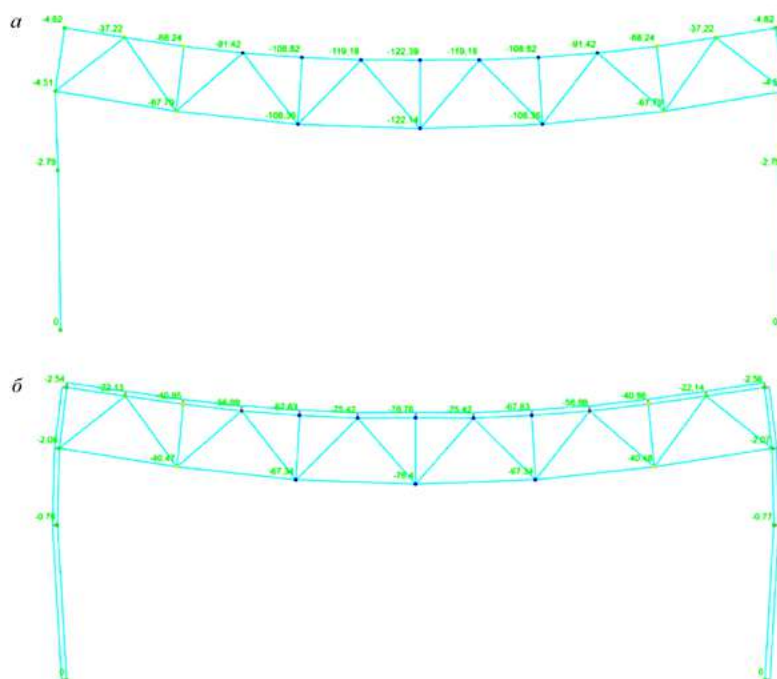


Рис. 2. Деформированные схемы поперечных рам каркасов производственного здания от комбинации приложенных нагрузок, мм:

a — металлическая рама, *б* — комбинированная металлическая рама

с традиционными конструкциями металлических каркасов имеет на 25 % более низкую стоимость;

– инновационная конструкция металлического каркаса производственного здания по сравнению с традиционными конструкциями металлических каркасов обладает на 35 % более высокой жесткостью;

– инновационная конструкция металлического каркаса производственного здания по сравнению с традиционными конструкциями металлических каркасов демонстрирует большую стойкость к прогрессирующему обрушению при действии особых нагрузок.

Таким образом, инновационная конструкция каркаса здания приводит к снижению материалоемкости, повышению жесткости и эксплуатационной надежности каркаса одноэтажного промышленного (производственных) здания.

Заключение

Предложена новая конструкция металлического каркаса производственного здания повышенной жесткости, состоящая из стальных ступенчатых колонн, стальных ферм покрытия, стальных подкрановых балок, системы вертикальных и горизонтальных связей, а также плит покрытия и стеновых панелей.

В качестве инновации предложены железобетонные плиты покрытия, жестко прикрепленные к верхним поясам ферм, и железобетонные стеновые панели, жестко прикрепленные к наружным поверхностям колонн каркаса.

Выполнен расчет нескольких вариантов каркаса производственного здания, установлена величина снижения веса конструкции, ее стоимости, повышения жесткости инновационного конструктивного решения.

Подтверждены основные преимущества комбинированных сталебетонных конструкций в каркасах одноэтажных промышленных зданий.

Инновационная конструкция каркаса имеет более низкий вес на 18 % при снижении стоимости на 25 % и повышении жесткости на 35 % в сравнении с традиционными конструкциями металлических каркасов.

Предлагаемая конструкция каркаса может быть эффективна в промышленных (производственных) зданиях с большими пролетами, в том числе на транспорте.

Список источников

1. Веселов В. В. Проблемы расчетов строительных конструкций с применением программных комплексов / В. В. Веселов // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы X научно-практической конференции, 10–11 октября 2019 года / под ред. А. В. Улыбина. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. — С. 22–27.
2. Веселов В. В. Повреждаемость и резервы несущей способности каркасов промышленных зданий / В. В. Веселов, М. С. Абу-Хасан // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2022. — № 3(1051). — С. 56–58.
3. Веселов В. В. Безопасная эксплуатация зданий и сооружений на транспорте / В. В. Веселов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2023. — Т. 20. — № 1. — С. 161–171. — DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171.
4. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения.
5. Веселов В. В. Инновационное проектирование зданий и сооружений с учетом особых нагрузок и воздействий / В. В. Веселов, Ю. Е. Супонева // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы конференции. — 2018. — С. 74–77.
6. Веселов В. В. Проектирование покрытий одноэтажных зданий с применением сталежелезобетонных конструкций / В. В. Веселов, Ю. С. Козуб // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXIX Всероссийской научно-технической конференции сту-

дентов, аспирантов и молодых ученых. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. — С. 165–169.

7. Талантова К. В. Совершенствование структурных покрытий общественных зданий / К. В. Талантова, А. С. Фисенко // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2022. — № 5(761). — С. 31–40. — DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-31-40.

8. Опанасенко Е. В. Эффективность применения сталебетонных конструкций в каркасах промышленных зданий / Е. В. Опанасенко // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2013. — Т. 3. — С. 355–360.

9. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: методическое пособие. — М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018.

10. Патент № 2401364 С2 Российская Федерация, МПК E04B 1/00. Конструктивные средства увеличения пространственной жесткости одноэтажных промышленных зданий с мостовыми кранами: № 2008130209/03: заявл. 21.07.2008: опубл. 10.10.2010 / Т. В. Золина, А. И. Сапожников; заявитель: Областное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский инженерно-строительный институт» (АИСИ).

11. Веселов В. В. Несущая способность стальных стропильных ферм эксплуатируемых промышленных зданий / В. В. Веселов // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: материалы XVII научно-методической конференции ВИТУ, Санкт-Петербург, 21 марта 2013 года. — СПб.: Военный инженерно-технический университет, 2013. — С. 94–97.

12. Патент на полезную модель № 170094 U1 Российская Федерация, МПК B66C 6/00. Подкрановая балка: № 2016140914: заявл. 18.10.2016: опубл. 13.04.2017 / В. В. Веселов; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

13. Патент № 2627810 C1 Российская Федерация, МПК E04C 3/293, E04C 3/07, E04B 1/30. Сталебетонная балка: № 2016119481: заявл. 19.05.2016: опубл. 11.08.2017 / В. В. Егоров, В. В. Веселов; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

14. Патент на полезную модель № 182163 U1 Российская Федерация, МПК E04C 3/293. Сталебетонная ферма: № 2018117051: заявл. 07.05.2018: опубл. 06.08.2018 / В. В. Веселов; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

15. Патент на полезную модель № 192327 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/24, E04B 1/32. Каркас арочного здания: № 2019117818: заявл. 07.06.2019: опубл. 12.09.2019 / В. В. Веселов, Ю. С. Козуб; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

16. Патент № 2753878 C1 Российская Федерация, МПК E04C 3/34. Ступенчатая колонна: № 2020141271: заявл. 14.12.2020: опубл. 24.08.2021 / В. В. Веселов, О. А. Бакина; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

17. Патент № 2840108 C1 Российская Федерация, МПК E04B 1/30. Каркас одноэтажного здания повышенной стойкости к прогрессирующему обрушению: № 2024125684: заявл. 18.07.2024: опубл. 19.05.2025 / В. В. Веселов, А. Н. Журавлева, А. А. Калинин; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

18. Патент № 2836447 C1 Российская Федерация, МПК E04B 1/00. Каркас одноэтажного промышленного

здания повышенной жесткости: № 2023136154: заявл. 29.12.2023; опубл. 17.03.2025 / В. В. Веселов, Г. М. Кондуков; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

19. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23—81 (с поправкой, с изменением № 1).

20. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования.

Дата поступления: 15.09.2025

Решение о публикации: 19.10.2025

Контактная информация:

ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — канд. техн. наук, доц.; veselov.1977@inbox.ru

Innovative Designs of Industrial Building Frames

V. V. Veselov

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

For citation: Veselov V. V. Innovative Designs of Industrial Building Frames // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1025–1034. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1025-1034

Summary

Purpose: To analyze the use of steel-concrete composite structures in single-storey industrial building frames, including those related to transport. To explore potential reductions in material consumption and overall costs associated with the proposed innovative composite building frame design, while enhancing rigidity and reliability. **Methods:** Analysis of established design solutions for composite structures and calculation of various frame options using calculation software packages in accordance with current methodologies. **Results:** Conventional industrial building frames that utilize metal structures do not consistently provide adequate rigidity or resistance to progressive collapse. They are susceptible to various forms of damage from force and mechanical stress, as well as specific loads and effects, particularly in transportation context. Typically, frames for industrial buildings with large spans require additional structural measures to mitigate the risk of progressive collapse. The Department of “Building Structures, Buildings, and Constructions” at SPTU (Petersburg State Transport University) is engaged in the development of advanced structural solutions for building frames and their components characterized by enhanced rigidity, load-bearing capacity, and reliability. An innovative design for a highly rigid industrial building has been proposed, which includes columns, roof trusses, gantry beams, as well as a bracing system, roofing, and wall panels. The roofing is constructed from ribbed reinforced concrete slabs with monolithic concrete joints, with the supporting transverse ribs rigidly connected to the upper chord of the roof trusses through welded joints. The wall panels are made of reinforced concrete slabs with monolithic concrete joints, where the supporting transverse ribs are securely welded to the outer surface of the columns. Several options for an industrial building frame have been calculated, establishing the reduction in the weight of the structure, its cost, and the increase in the rigidity of the innovative design. **Practical significance:** The primary advantages of steel-concrete composite frame structures in single-storey industrial buildings have been evaluated. The innovative frame design demonstrates a weight reduction of 18%, a cost decrease of 25%, and a rigidity increase of 35% compared to traditional metal frame designs. The proposed frame design may prove to be effective in industrial buildings with large spans, as well as on transportation facilities.

Keywords: Single-storey buildings, industrial buildings, frame, metal structures, composite structures, steel concrete, specific loads, bearing capacity, rigidity, progressive collapse.

References

1. Veselov V. V. Problemy raschetov stroitel'nykh konstruktsey s primeneniem programmnykh kompleksov [Problems of structural calculations using software complexes]. *Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy X nauchno-prakticheskoy konferentsii, 10–11 oktyabrya 2019 goda* [Inspection of buildings and structures: problems and solutions: proceedings of the X scientific-practical conference, October 10–11, 2019]. Saint Petersburg: Politekhnikheskiy Universitet Publ., 2019, pp. 22–27. (In Russian)
2. Veselov V. V., Abu-Khasan M. S. Povrezhdaemost' i rezervy nesushchey sposobnosti karkasov promyshlennykh zdaniy [Damageability and reserves of load-bearing capacity of industrial building frames]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Bulletin of Building Machinery]. 2022, Iss. 3(1051), pp. 56–58. (In Russian)
3. Veselov V. V. Bezopasnaya ekspluatatsiya zdaniy i sooruzheniy na transporte [Safe operation of buildings and structures in transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023, vol. 20, Iss. 1, pp. 161–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171. (In Russian)
4. SP 385.1325800.2018. Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design rules. Main provisions]. (In Russian)
5. Veselov V. V., Suponeva Yu. E. Innovatsionnoe proektirovanie zdaniy i sooruzheniy s uchetom osobykh nagruzok i vozdeystviy [Innovative design of buildings and structures considering special loads and impacts]. *Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii: materialy konferentsii* [Innovative technologies in construction and geoecology: conference proceedings]. 2018, pp. 74–77. (In Russian)
6. Veselov V. V., Kozub Yu. S. Proektirovanie pokrytiy odnoetazhnykh zdaniy s primeneniem stalezhelezobetonnykh konstruktsey [Design of roofs for single-storey buildings using steel-reinforced concrete structures]. *Transport: problema, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXIX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Transport: problems, ideas, prospects: proceedings of the LXXIX All-Russian scientific-technical conference of students, postgraduates and young scientists]. Saint Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2019, pp. 165–169. (In Russian)
7. Talantova K. V., Fisenko A. S. Sovershenstvovanie strukturnykh pokrytiy obshchestvennykh zdaniy [Improvement of structural roofs of public buildings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction]. 2022, Iss. 5(761), pp. 31–40. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-31-40. (In Russian)
8. Opanasenko E. V. Effektivnost' primeneniya stale-betonnykh konstruktsey v karkasakh promyshlennykh zdaniy [Efficiency of using steel-concrete structures in industrial building frames]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and research in the transport complex]. 2013, vol. 3, pp. 355–360. (In Russian)
9. Proektirovanie meropriyatiy po zashchite zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya: metodicheskoe posobie [Design of measures for protecting buildings and structures against progressive collapse: methodological guide]. Moscow: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii Publ., 2018. (In Russian)
10. Zolina T. V., Sapozhnikov A. I. Konstruktivnye sredstva uvelicheniya prostranstvennoy zhestkosti odnoetazhnykh promyshlennykh zdaniy s mostovymi kranami [Structural means for increasing spatial rigidity of single-storey industrial buildings with overhead cranes]. Patent RF, no. 2401364, 2010. (In Russian)
11. Veselov V. V. Nesushchaya sposobnost' stal'nykh stropil'nykh ferm ekspluatiruemykh promyshlennykh zdaniy [Load-bearing capacity of steel trusses of operated industrial buildings]. *Defekty zdaniy i sooruzheniy. Usilenie stroitel'nykh konstruktsey: materialy XVII nauchno-metodicheskoy konferentsii VITU, Sankt-Peterburg, 21 marta 2013 goda* [Defects of buildings and structures. Strengthening of building structures: proceedings of the XVII scientific-methodological conference of VITU, Saint Petersburg, March 21,

2013]. Saint Petersburg: Voenny inzhenerno-tekhnicheskiy universitet Publ., 2013, pp. 94–97. (In Russian)

12. Veselov V. V. *Podkranovaya balka* [Crane runway beam]. Patent RF, no. 170094, 2017. (In Russian)

13. Egorov V. V., Veselov V. V. *Stalebetonnaya balka* [Steel-concrete beam]. Patent RF, no. 2627810, 2017. (In Russian)

14. Veselov V. V. *Stalebetonnaya ferma* [Steel-concrete truss]. Patent RF, no. 182163, 2018. (In Russian)

15. Veselov V. V., Kozub Yu. S. *Karkas arochnogo zdaniya* [Arch building frame]. Patent RF, no. 192327, 2019. (In Russian)

16. Veselov V. V., Bakina O. A. *Stupenchataya kolonna* [Stepped column]. Patent RF, no. 2753878, 2021. (In Russian)

17. Veselov V. V., Zhuravleva A. N., Kalinin A. A. *Karkas odnoetazhnogo zdaniya povyshennoy stoykosti k progressiruyushchemu obrusheniyu* [Frame of a single-storey building with increased resistance to progressive collapse]. Patent RF, no. 2840108, 2025. (In Russian)

18. Veselov V. V., Kondukov G. M. *Karkas odnoetazhnogo promyshlennogo zdaniya povyshennoy zhestkosti* [Frame of a single-storey industrial building with increased rigidity]. Patent RF, no. 2836447, 2025. (In Russian)

19. SP 16.13330.2017. *Stal'nye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-23—81 (s popravkoy, s izmeneniyem № 1)* [Steel structures. Updated version of SNIp II-23—81 (with amendment, change № 1)]. (In Russian)

20. SP 266.1325800.2016. *Konstruksii stalezhelezobetonnnye. Pravila proektirovaniya* [Steel-reinforced concrete structures. Design rules]. (In Russian)

Received: September 15, 2025

Accepted: October 19, 2025

Author's information:

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering, Associate Professor; veselov.1977@inbox.ru

УДК 621.54+06

Исследование факторов влияния на срок службы силикагелей

Т. Л. Риполь-Сарагоси¹, Д. А. Мальцев²

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

²ООО НПО «Турбулентность — ДОН», Российская Федерация, 344068, Ростов-на-Дону, а/д Ростов-на-Дону-Новошахтинск, 1-й км, стр. 6/8

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л., Мальцев Д. А. Исследование факторов влияния на срок службы силикагелей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1035–1044. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1035-1044

Аннотация

Цель: Представить результаты исследования, посвященного анализу влияния температуры и относительной влажности атмосферного воздуха, поступающего в компрессор на сжатие, а также требуемого класса его чистоты после адсорбционной осушки. Определить степень воздействия данных параметров на срок службы адсорбента марки КСКГ для решения вопроса о целесообразности его применения.

Методика: Для определения степени влияния физических параметров атмосферного и сжатого воздуха, а также нормативного класса чистоты воздуха на выходе из компрессора на срок службы адсорбента была апробирована методика расчета длительности эксплуатации адсорбента с учетом указанных факторов. **Методы:** В работе использованы методы сравнения и анализа полученных результатов с их последующей графической визуализацией, которая впоследствии легла в основу сформулированных выводов и рекомендаций по обоснованию возможности использования исследуемого адсорбента по критерию «длительность срока эксплуатации». **Практическая значимость:** Результаты представленных исследований позволяют обоснованно осуществлять выбор адсорбента для использования его в технологии адсорбционной осушки с последующим применением в пневмосистемах подвижного состава железнодорожного транспорта и на предприятиях железнодорожной отрасли. Это позволит реализовать программу по снижению ресурсоемкости и снизить отрицательное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения объемов захоронения отработанных ресурсов.

Ключевые слова: Ресурсосбережение, сжатый воздух, атмосферный воздух, срок эксплуатации, окружающая среда, адсорбция, адсорбент.

Как правило, срок службы любых адсорбентов зависит от многих факторов. Выделим из них три основных: температура поступления атмосферного воздуха в компрессор, относительная влажность атмосферного воздуха на входе в компрессор и требуемая влажность осушенного сжатого воздуха после адсорбционной осушки в адсорбере в соответствии с принятыми нормативными документами.

Помимо сказанного выше, определенное влияние на срок службы адсорбентов могут оказывать

химические факторы, такие как наличие агрессивных сред как в сжатом воздухе, так и в адсорбенте, которые способствуют разрушению последнего, в значительной степени снижая его влагоемкость. Наличие капельной влаги в сжатом воздухе также снижает влагоемкость, а значит, эффективность адсорбента, приводя к снижению его срока службы.

Исключение здесь могут составлять только алюмогели марки Д, которые демонстрируют достаточную устойчивость к воздействию

капельной влаги, однако при высокой влажности 90–100 % способны разрушаться. Последствием такого разрушения будет снижение их влагоемкости и срока службы.

Рассматривая такой фактор влияния на величину срока службы адсорбентов, как температура сжатого воздуха на входе в адсорбер, можно предположить существование их взаимобратного воздействия: чем выше температура входа, тем меньше срок службы адсорбента.

Особенно увеличение температуры входа сжатого воздуха в адсорбер, а значит, и увеличение температуры самого адсорбента в ходе адсорбционной осушки, оказывает влияние на изменение объема гранул адсорбента, приводя к их движению, увеличению сил трения, истиранию и разрушению. Это, в свою очередь, способствует снижению эффективности адсорбента как влагопоглотителя.

Безусловно, решение проблемы увеличения срока службы адсорбента при снижении влияния всех вышеописанных факторов или любого из них позволило бы повысить надежность работы адсорбционной установки за счет увеличения времени между техническими осмотрами, связанными с заменой адсорбционной засыпки из-за утраты влагопоглощающей способности, а также снизить отрицательное воздействие на окружающую среду при уменьшении количества подлежащего захоронению адсорбента.

Задача исследований, представленных в данной статье и направленных на решение проблемы ресурсосбережения в различных отраслях промышленности (в том числе на предприятиях железнодорожного транспорта и в пневмосистемах подвижного состава железных дорог, использующих сжатый воздух в качестве рабочего тела), согласуется с положениями Энергетической стратегии России до 2030 г. в области энергоресурсосбережения. Этим определяется актуальность представляемых в работе результатов исследований.

Объект исследования

Объектом исследования выбран силикагель марки КСКГ как одна из марок силикатных гелей, отличающихся высокой прочностью. При этом КСКГ — это крупнопористый гранулированный силикагель.

Исследования по определению зависимости срока службы силикагеля от температуры окружающей среды и ее относительной влажности будут проведены для температур наружного воздуха $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ как наиболее опасных, особенно при работе тормозных приборов пневмосистем подвижного состава железных дорог. Изменение относительной влажности наружного воздуха будет исследовано в пределах от 50% до 100%. Очевидно также, что требуемое на выходе из адсорбера содержание влаги в осушенном сжатом воздухе, соответствующее определенному классу чистоты [1, 2], будет также влиять на срок службы адсорбента.

Представим ниже алгоритм расчета срока службы выбранного для исследования адсорбента [3–6].

Определим концентрацию влаги в паровоздушном потоке C_s , соответствующую условию насыщения по формуле [3]:

$$C_s = \frac{P_s M}{RT_1}, \quad (1)$$

где P_s — давление насыщенного пара воды, мм рт. ст.;

M — молекулярная масса воды, г/моль;

R — газовая постоянная, равная $62,36\text{ мм рт. ст.} \cdot \text{л}/(\text{К} \cdot \text{моль})$;

T_1 — температура воздуха на входе в компрессор, К.

$$C_s = \frac{3,17 \cdot 18,01}{62,36 \cdot 268} = 0,0034\text{ кг/м}^3 = 3,4\text{ г/м}^3.$$

Концентрация влаги в воздухе на выходе компрессора:

$$C_{s1} = \frac{P_s M}{RT_2} 0,6, \quad (2)$$

где T_2 — температура сжатого воздуха на выходе компрессора. Тогда получим:

$$C_{s1} = \frac{55,3 \cdot 18,01}{62,36 \cdot 313} 0,6 = 30,6 \text{ г/м}^3.$$

Относительная концентрация влаги в поступающем воздухе равна:

$$C = \frac{C_{s1}}{C_s};$$

$$C = \frac{31}{3,4} = 8,96.$$

Определим коэффициент, который является отношением поверхностного натяжения данного адсорбата и адсорбата стандартного вещества. Этот коэффициент называется коэффициентом аффинности и обозначается как β . Принято стандартным веществом считать бензол, в этом случае коэффициент аффинности определяется по формуле:

$$\beta = \frac{П}{П_{ст}}, \quad (3)$$

где $П$ и $П_{ст}$ — паракоры воды и бензола.

В нашем случае ТОЗМ (теория объемного заполнения микропор) предполагает использовать ингредиенты паракоров по Сегдену. Паракор бензола $П_{ст} = 207,1$. Паракор воды $П = 192,3$ [3, 7, 8].

Следовательно, коэффициент аффинности в нашем случае будет равен:

$$\beta = \frac{192,3}{207,1} = 0,93.$$

Согласно уравнению ТОЗМ (уравнение Дубинина — Радускевича) [5], равновесная величина адсорбции влаги X будет определена по представленной ниже формуле:

$$X(C_0) = W \cdot \rho \cdot e \left[-B \left(\left(\frac{T_1}{\beta} \right)^2 \lg \left(\frac{C_s}{C} \right)^2 \right) \right], \quad (4)$$

где W — предельный объем микропор в адсорбенте, см³/г. Для силикагеля КСКГ равна 0,85 см³/г;

B — структурная константа адсорбента, равна $3,35 \cdot 10^{-6}$ [6];

T_1 и C — условия опытов, для которых ищут значение X ;

ρ — плотность адсорбата в адсорбированной фазе, г/см³.

В данном случае $\rho = 0,998$ г/см³ [7].

Далее, для определения срока службы адсорбента, необходимо определить предельную возможность слоя адсорбента $ПВ_c$.

Предельная возможность слоя МС (массообмена) определяется следующим образом:

$$ПВ_c = \frac{X(C_0) \cdot \rho_n \cdot 10^3}{C_s - C_0}, \quad (5)$$

где ρ_n — насыпная плотность адсорбента, г/м³;

C_0 — конечное влагосодержание, принимается в зависимости от класса чистоты сжатого воздуха по DIN ISO 8573-1. Для 1-го класса чистоты влагосодержание составляет 0,0028 г/м³ (точка россы -70 °С), 2-го — 0,119 г/м³ (точка россы -40 °С) и 3-го класса — 0,884 г/м³ (точка россы -20 °С).

$$ПВ_c = \frac{0,953 \cdot 400 \cdot 10^3}{3,4 - 0,119} = 1,16 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Количество воздуха, которое может осушить слой адсорбента, определим как

$$G_{осуш} = ПВ_c \cdot V, \quad (6)$$

где V — объем слоя адсорбента, 1 м³:

Таблица 1. Исследование срока службы силикагеля марки КСКГ в зависимости от класса чистоты, влажности атмосферного воздуха (50–100 %) и температурных условий

Класс чистоты		1 класс			2 класс			3 класс		
Влажность, %	Срок службы	–5° С	0° С	5° С	–5° С	0° С	5° С	–5° С	0° С	5° С
50	Часов	2518	1643	1077	2702	1726	1115	5210	2584	1453
	Дней	105	68	45	113	72	46	217	108	61
60	Часов	2007	1308	856	2128	1362	881	3524	1877	1091
	Дней	84	54	36	89	57	37	147	78	45
70	Часов	1657	1078	704	1742	1116	722	2626	1457	864
	Дней	69	45	29	73	47	30	109	61	36
80	Часов	1404	912	595	1466	940	608	2073	1181	710
	Дней	58	38	25	61	39	25	86	49	30
90	Часов	1213	787	513	1260	809	523	1700	987	599
	Дней	51	33	21	53	34	22	71	41	25
100	Часов	1064	690	449	1101	707	457	1434	843	516
	Дней	44	29	19	46	29	19	60	35	22

$$G_{\text{осуш}} = 1,16 \cdot 10^5 \cdot 1 = 115\,633,5 \text{ м}^3.$$

Далее срок службы адсорбента рассчитаем по формуле:

$$A = \frac{G_{\text{осуш}}}{G}; \quad (7)$$

$$A = \frac{115\,633,5}{105} = 1101,3 \text{ ч.}$$

В табл. 1 представлены результаты расчета срока службы адсорбента марки КСКГ при различных параметрах: изменяющейся относительной влажности атмосферного воздуха в заданных пределах, указанных температурах и содержании влаги в осушенном воздухе, соответствующем 1-му классу чистоты.

Проведем графическую визуализацию (рис. 1) по результатам, представленным в табл. 1.

Обсуждение

Полученные по результатам расчетов графические зависимости позволяют определить влияние вышеуказанных факторов на срок службы адсорбента. Так, в пределах требуемого класса

чистоты по влаге выходящего из адсорбера сжатого воздуха при 50%-й влажности атмосферного воздуха и изменении его температуры от –50 до +50 °С уменьшение срока службы адсорбента составляет 57,1 %, а при 100%-й влажности и аналогичном изменении температур уменьшение срока службы составляет 56,8 %. Это говорит об адекватности полученных результатов расчета, лежащих в пределах погрешности.

Ниже представлена табл. 1, в которой даны результаты расчета срока службы адсорбента для различных классов чистоты, при вышеуказанном изменении относительной влажности и температуры атмосферного воздуха.

Ниже проведем графическую визуализацию (рис. 1–3) полученных и представленных в табл. 1 результатов, на основании которых можно сделать следующие выводы:

- С увеличением влажности и температуры всасываемого из атмосферы в компрессор воздуха, его сжатия и осушки в адсорбере (адсорбент КСКГ) срок службы адсорбента уменьшается.
- Процент снижения срока службы для требований 1-го класса чистоты по содержанию влаги в сжатом воздухе при увеличении влагосодер-

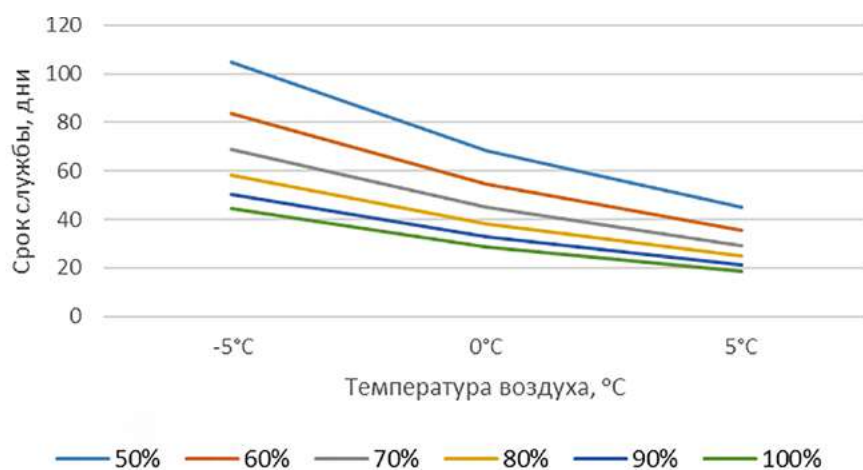


Рис. 1. График зависимости срока службы силикагеля марки КСКГ от относительной влажности и температуры атмосферного воздуха в соответствии с требованиями 1-го класса чистоты

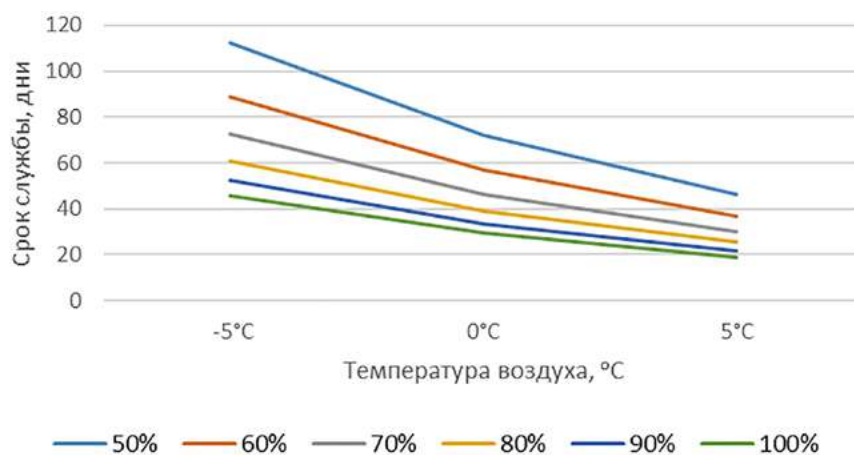


Рис. 2. График зависимости срока службы силикагеля марки КСКГ от относительной влажности и температуры атмосферного воздуха в соответствии с требованиями 2-го класса чистоты

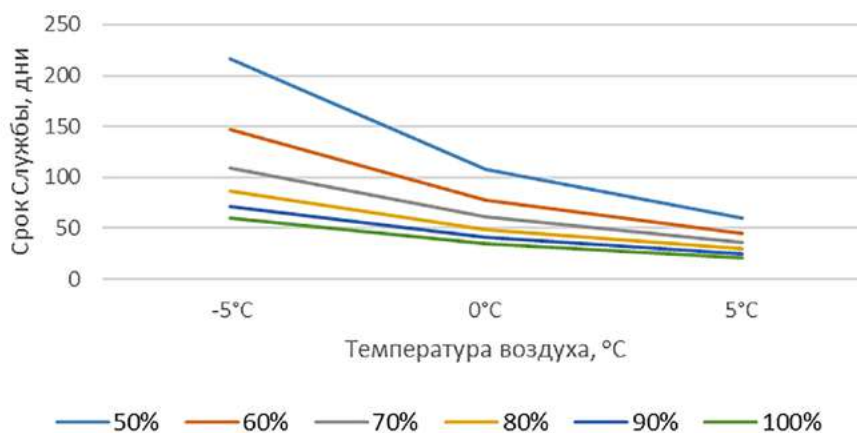


Рис. 3. График зависимости срока службы силикагеля марки КСКГ от относительной влажности и температуры атмосферного воздуха в соответствии с требованиями 3-го класса чистоты

жания и снижении температуры атмосферного воздуха составляет от 58 % до 57 %. Для второго класса чистоты и аналогичных изменениях параметров атмосферного воздуха это снижение составляет 59–58 %, а для 1-го класса чистоты — 72–64 %.

Таким образом, очевидно, что наибольшее влияние на срок службы адсорбента оказывает требуемая величина влагосодержания в сжатом воздухе после прохождения им адсорбционной осушки, которая соответствует определенному классу чистоты [1].

В вышепредставленных результатах, связанных с определением факторов влияния на срок службы адсорбента — силикагеля марки КСКГ, установлено, что наибольшее влияние из трех рассматриваемых факторов имеет класс чистоты. При этом стоит отметить, что результаты по определению срока службы адсорбента предусматривали безостановочную работу компрессора, а именно продолжительность его включения (ПВк), равную 100 %, что в эксплуатационных режимах на подвижном составе железных дорог и в режиме эксплуатации пневматических систем предприятий практически исключено.

Следовательно, целесообразным является рассмотрение реальных режимов работы компрессора для обеспечения сжатым воздухом, например, пневмосистем подвижного состава железных дорог. Именно для этих режимов работы следует определять срок службы адсорбента.

Согласно [9, 10], для предотвращения перегрева компрессора и преждевременного выхода из строя режим его работы устанавливают повторно-кратковременным, а именно:

- ПВк под нагрузкой — не более 50 %;
- оптимальный — ПВк — 20 %.

Рассчитаем срок службы адсорбента при оптимальном режиме с ПВк 20 % и максимально возможном с ПВк 50 %. Данные проведенных расчетов представлены в табл. 2.

Графическая визуализация представленных в таблице результатов расчета изображена на рис. 4–6.

Здесь стоит отметить, что снижение продолжительности включения компрессора приводит к увеличению срока службы адсорбента. Это происходит по причине значительного уменьшения расхода сжатого воздуха, проходящего через адсор-

Таблица 2. Срок службы силикагеля марки КСКГ с ПВк = 20 % и ПВк = 50 %

Класс чистоты		1-й класс			2-й класс			3-й класс		
Влажность, %	Срок службы	–5° С	0° С	5° С	–5° С	0° С	5° С	–5° С	0° С	5° С
ПВк 20 %										
50	Дней	524	342	224	563	360	232	1085	538	303
60	Дней	418	272	178	443	284	183	734	391	227
70	Дней	345	225	147	363	233	150	547	304	180
80	Дней	292	190	124	305	196	127	432	246	148
90	Дней	253	164	107	263	168	109	354	206	125
100	Дней	222	144	94	229	147	95	299	176	108
ПВк 50 %										
50	Дней	210	137	90	225	144	93	434	215	121
60	Дней	167	109	71	177	114	73	294	156	91
70	Дней	138	90	59	145	93	60	219	121	72
80	Дней	117	76	50	122	78	51	173	98	59
90	Дней	101	66	43	105	67	44	142	82	50
100	Дней	89	57	37	92	59	38	119	70	43

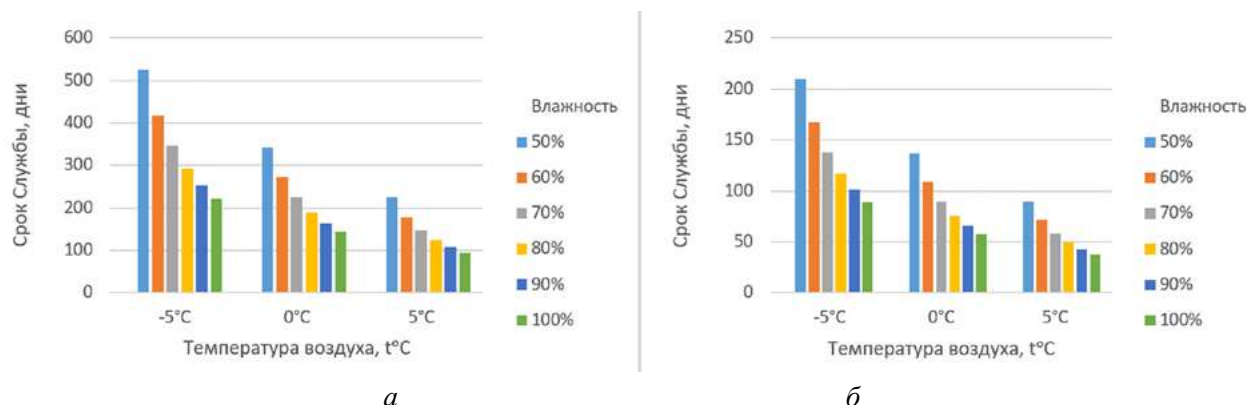


Рис. 4. Срок службы силикагеля марки КСКГ для 1-го класса чистоты при ПВк = 20 % (а) и ПВк = 50 % (б)

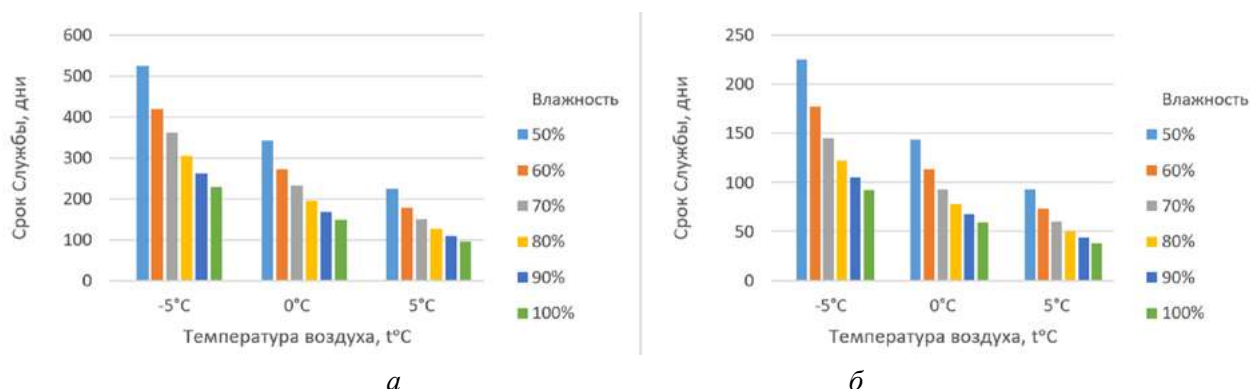


Рис. 5. Срок службы силикагеля марки КСКГ для 2-го класса чистоты при ПВк = 20 % (а) и ПВк = 50 % (б)

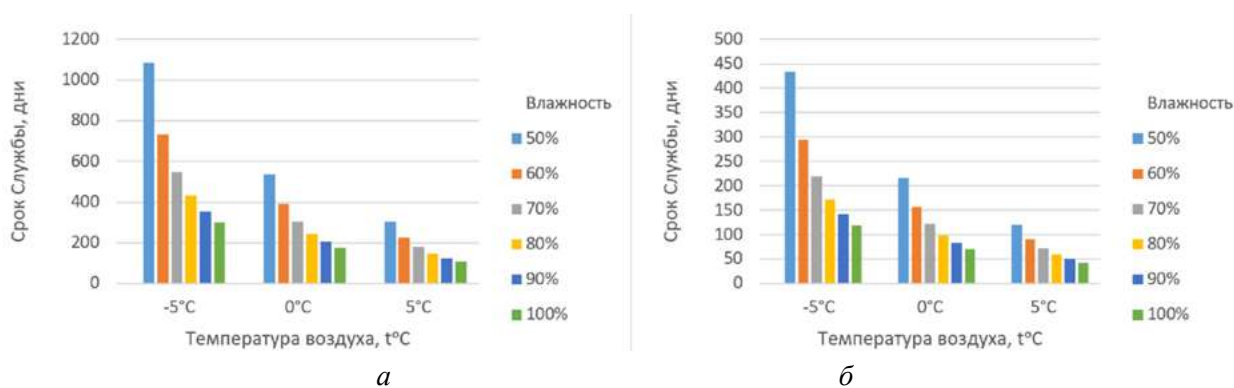


Рис. 6. Срок службы силикагеля марки КСКГ для 3-го класса чистоты при ПВк = 20 % (а) и ПВк = 50 % (б)

бер, и, следовательно, к уменьшению количества влаги, подлежащей поглощению адсорбентом.

Очевидно, что реальная работа компрессора для оптимальных режимов и даже режимов движения подвижного состава под нагрузкой значительно увеличит срок службы силикагеля марки КСКГ.

При этом ранее посчитанные проценты изменения срока службы адсорбента при различных величинах параметров влияния остаются практи-

чески неизменными, что подтверждает адекватность полученных результатов.

Выводы

На основании анализа результатов, полученных при проведении исследований по определению факторов влияния на срок службы адсорбента — силикагеля марки КСКГ, установлено, что ими являются:

- относительная влажность атмосферного воздуха;
- температура атмосферного воздуха;
- требуемый класс чистоты сжатого воздуха;
- продолжительность включения компрессора.

Исследования показали, что с увеличением относительной влажности атмосферного воздуха и его температуры срок службы адсорбента уменьшается. С повышением требований по классу чистоты к осушаемому в адсорбере сжатому воздуху срок его службы также уменьшается. Снижение времени работы компрессора, выражающееся в уменьшении ПВк, увеличивает срок службы силикагеля КСКГ.

Таким образом, рассчитанные в работе величины срока службы силикагеля марки КСКГ сопоставимы с данными производителей, что позволяет рекомендовать его к промышленному применению на подвижном составе железных дорог и предприятиях железнодорожного транспорта.

Список источников

1. ГОСТ 32202—2013. Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава. — М.: Стандартинформ, 2013.
2. Риполь-Сарагоси Т. Л. Снижение энергоемкости процесса адсорбции при использовании композитных адсорбентов / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2021 года. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. — Т. 2. — С. 83–86.
3. Шумяцкий Ю. И. Адсорбционные процессы: учебное пособие / Ю. И. Шумяцкий. — М.: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2005.
4. Дубинин М. М. Адсорбционные свойства и структура силикагелей и алюмогелей / М. М. Дубинин, А. Г. Зуев // Доклады Академии наук СССР. Физическая химия. — 1949. — Т. LXIX. — № 2.

5. Риполь-Сарагоси Т. Л. Исследование зависимости энергетической эффективности технологии адсорбционной осушки сжатого воздуха от модификации алюмогеля // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2024. — Т. 21. — Вып. 4. — С. 922–930. — DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-922-930.

6. Гаврилова Н. Н. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных: учебное пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. — 132 с.

7. Горшунова В. П. Сравнительные адсорбционные свойства термохимически модифицированных кремнеземных сорбентов и алюмогеля / В. П. Горшунова, А. В. Рыльков, О. В. Чибисова, В. А. Небольсин // Химия, новые материалы, химические технологии: внутривузовский сборник научных трудов. — Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2011. — Вып. 1. — С. 81–86.

8. Кожевникова И. В. Промышленные отходы силикагеля, цеолита и алюмогеля как основная составляющая полиуретановых композиционных материалов / И. В. Кожевникова, Т. Р. Сафиуллина, Л. А. Зенитова // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии: материалы IX международной научно-практической конференции, Нижнекамск, 05–07 апреля 2016 года. — Нижнекамск: ПАО «Нижнекамскнефтехим», 2016. — С. 56.

9. ГОСТ 10393—2014. Компрессоры, агрегаты компрессорные с электрическим приводом и установки компрессорные с электрическим приводом для железнодорожного подвижного состава. — М.: Стандартинформ, 2015.

10. Смаглюков Д. А. Устройство и эксплуатация электровагона ЭП20: учебное пособие / Д. А. Смаглюков. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015. — 360 с.

Дата поступления: 21.07.2025

Решение о публикации: 06.08.2025

Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф.; ripol-saragosi@mail.ru

МАЛЫЦЕВ Дмитрий Алексеевич — инженер; dmitrimalzev2000@gmail.com

Assessment of the Factors Affecting the Service Lifespan of Silica Gel

T. L. Ripol-Saragosi¹, D. A. Maltsev²

¹ Rostov State Transport University, 2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

² LLC NPO Turbulence-DON, 1st km, Building 6/8, Rostov-on-Don-Novoshakhtinsk Road, Rostov-on-Don, 344068, Russian Federation

For citation: Ripoll-Saragosi T. L., Maltsev D. A. Assessment of the Factors Affecting the Service Lifespan of Silica Gel // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1035–1044. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1035-1044

Summary

Purpose: To present the results of research conducted to analyze the influence of temperature and relative humidity of the atmospheric air entering the compressor system, as well as the required purity class after adsorption drying on the service lifespan of the KSKG brand adsorbent. To determine the feasibility of their use. **Methodology:** In order to ascertain the extent to which the selected physical parameters of atmospheric and compressed air and its statutory purity class at the compressor outlet influence the adsorbent service lifespan, a methodology for calculating the adsorbent lifespan was tested, considering the above-mentioned factors. **Methods:** The results obtained were compared and analyzed. Following this, the results were graphically visualized. Subsequent conclusions and recommendations have been formulated to substantiate the potential use of the adsorbent under study according to the criterion of “service lifespan”. **Practical significance:** The findings of the aforementioned studies provide a solid foundation for the selection of an adsorbent that is optimally suited for utilization in adsorption drying technology, particularly within pneumatic systems employed in railway rolling stock and railway industry enterprises. This selection will empower the implementation of a programme aimed at enhancing resource conservation and mitigating the adverse environmental impact by decreasing the amount of waste generated from used resources.

Keywords: Resource conservation, compressed air, atmospheric air, service lifespan, environment, adsorption, adsorbent.

References

1. GOST 32202—2013. *Szhatyy vozdukh pnevmaticheskikh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Compressed air of pneumatic systems of railway rolling stock]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. (In Russian)

2. Ripol'-Saragosi T. L., Gladkikh M. A. Snizhenie energoemkosti protsessa adsorbtsii pri ispol'zovanii kompozitnykh adsorbentov [Reducing the energy intensity of the adsorption process using composite adsorbents]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Rostov-na-Donu, 19–21 aprelya 2021 goda* [Transport: science, education, production: collection

of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 19–21, 2021]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2021, vol. 2, pp. 83–86. (In Russian)

3. Shumyatskiy Yu. I. *Adsorbtsionnye protsessy: uchebnoe posobie* [Adsorption processes: textbook]. Moscow: Rossiyskiy khimiko-tehnologicheskii universitet im. D. I. Mendeleeva Publ., 2005. (In Russian)

4. Dubinin M. M., Zuev A. G. Adsorbtsionnye svoystva i struktura silikageley i alyumogeley [Adsorption properties and structure of silica gels and alumina gels]. *Doklady Akademii nauk SSSR. Fizicheskaya khimiya* [Reports of the

Academy of Sciences of the USSR. Physical chemistry]. 1949, vol. LXIX, Iss. 2. (In Russian)

5. Ripol'-Saragosi T. L. Issledovanie zavisimosti energeticheskoy effektivnosti tekhnologii adsorbtsionnoy osushki szhatogo vozdukha ot modifikatsii alyumogelya [Study of the dependence of the energy efficiency of compressed air adsorption drying technology on alumina modification]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 922–930. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-922-930. (In Russian)

6. Gavrilova N. N., Nazarov V. V. *Analiz poristoy struktury na osnove adsorbtsionnykh dannykh: uchebnoe posobie* [Analysis of porous structure based on adsorption data: textbook]. Moscow: RKhTU im. D. I. Mendeleeva Publ., 2015, 132 p. (In Russian)

7. Gorshunova V. P., Ryl'kov A. V., Chibisova O. V., Nebol'sin V. A. Sravnitel'nye adsorbtsionnye svoystva termokhimicheski modifitsirovannykh kremnezemnykh sorbentov i alyumogelya [Comparative adsorption properties of thermochemically modified silica sorbents and alumina]. *Khimiya, novye materialy, khimicheskie tekhnologii: vnutrivuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Chemistry, new materials, chemical technologies: intra-university collection of scientific papers]. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2011, Iss. 1, pp. 81–86. (In Russian)

8. Kozhevnikova I. V., Safiullina T. R., Zenitova L. A. Promyshlennyye otkhody silikagelya, tseolita i alyumogelya kak osnovnaya sostavlyayushchaya poliuretanovykh kom-

pozitsionnykh materialov [Industrial waste of silica gel, zeolite and alumina as the main component of polyurethane composite materials]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovatsionnogo razvitiya neftekhimii: materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 05–07 aprelya 2016 goda* [Current state and prospects of innovative development of petrochemical industry: materials of the IX International Scientific and Practical Conference, 05–07 April 2016]. Nizhnekamsk: PAO "Nizhnekamskneftekhim" Publ., 2016, p. 56. (In Russian)

9. GOST 10393—2014. *Kompressory, agregaty kompressornye s elektricheskim privodom i ustanovki kompressornye s elektricheskim privodom dlya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Compressors, compressor units with electric drive and compressor installations with electric drive for railway rolling stock]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. (In Russian)

10. Smaglyukov D. A. *Ustroystvo i ekspluatatsiya elektrovoza EP20: uchebnoe posobie* [Design and operation of EP20 electric locomotive: textbook]. Moscow: OAO "Rossiyskie zheleznyye dorogi" Publ., 2015, 360 p. (In Russian)

Received: July 21, 2025

Accepted: 06.08.2025

Author's information:

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ripol-saragosi@mail.ru

Dmitriy A. MALTSEV — Engineer; dmitrimaltsev2000@gmail.com

УДК 656.084

Предотвращение непроизводственного травматизма на объектах ОАО «РЖД»

Н. И. Иост, О. К. Суворова

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

Для цитирования: Иост Н. И., Суворова О. К. Предотвращение непроизводственного травматизма на объектах ОАО «РЖД» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1045–1052. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1045-1052

Аннотация

Цель: Выявить ключевые факторы, преимущественно влияющие на высокий уровень непроизводственного травматизма на объектах ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»). Определить перечень наиболее эффективных мероприятий, направленных на снижение уровня непроизводственного травматизма. **Методы:** Проведен анализ статистических данных ОАО «РЖД» об уровне непроизводственного травматизма, а также факторов, способствующих высокому уровню непроизводственного травматизма на объектах ОАО «РЖД». Проведен сравнительный анализ эффективности мероприятий по снижению уровня непроизводственного травматизма. **Результаты:** На основании проведенного анализа выявлены причины непроизводственного травматизма в ОАО «РЖД». Определены основные группы факторов, влияющих на его уровень: личные, социальные, организационные, физические и психологические. Проанализированы существующие меры по предотвращению непроизводственного травматизма и сформулированы рекомендации по снижению его показателей. Установлено, что снижение уровня непроизводственного травматизма требует комплексного подхода, включающего мероприятия по обучению и информированию граждан, внедрение новых технологий и совершенствование методов управления безопасностью. Разработан перечень мероприятий по предотвращению непроизводственного травматизма на объектах ОАО «РЖД». **Практическая значимость:** Результаты работы имеют значение для снижения уровня непроизводственного травматизма на ОАО «РЖД».

Ключевые слова: Непроизводственный травматизм, факторы, меры предотвращения, рекомендации.

В связи с тем, что железная дорога и объекты ее инфраструктуры являются зоной повышенной опасности, на территории объектов ОАО «РЖД» требуется строгое соблюдение правил безопасного поведения.

В большинстве случаев непроизводственного травматизма на объектах ОАО «РЖД» непосредственной причиной становятся невнимательность и неосторожность, в том числе нахождение в состоянии алкогольного опьянения в зоне риска инфраструктуры железной дороги.

Для снижения непроизводственного травматизма на объектах пассажирского комплекса ОАО

«РЖД» проводятся специальные мероприятия, направленные на уменьшение риска несчастных случаев. В их рамках сооружаются путепроводы, пешеходные мосты и тоннели, устанавливается предупреждающая сигнализация, а также ограждаются опасные места [1].

По результатам статистического анализа данных Минтранса России по непроизводственному травматизму на железной дороге за последние шесть лет установлено, что с 2018 по 2024 г. число несчастных случаев снизилось на 29,5 %, в том числе на 26,3 % сократилось количество происшествий со смертельным исходом. Однако

статистика по детскому травматизму остается неутешительной. Так, в 2024 г. на железной дороге пострадало 132 ребенка, из них 88 погибли.

Минтранс совместно с Генпрокуратурой РФ, Главным управлением на транспорте МВД России, ОАО «РЖД», субъектами РФ и рядом профильных ведомств проводит системную работу по реализации технических мер и совершенствованию законодательства, направленных на предотвращение травматизма на железнодорожном транспорте [1].

По данным статистики, около 50 % случаев производственного травматизма происходит на железнодорожных путях между станциями, а среди основных причин травмирования — хождение по путям в неустановленных местах. Для снижения числа случаев на путях перегона необходима не только разработка технических мероприятий, но и разъяснительная работа с гражданами.

По результатам анализа причин несчастных случаев, выполненного ОАО «РЖД», установлено, что основными являются хождение по путям в неустановленных местах и переход железной дороги перед приближающимся поездом. При этом детский травматизм снизился на 38,9 %; 22 ребенка пострадали, из них 17 погибли. К несчастным случаям и даже к смерти приводят зацепинг и игры вблизи путей [1–4].

В соответствии с памяткой «О профилактике производственного травматизма», разрабатываемой администрациями муниципальных образований, определены действия, которые гражданам не допускаются на путях и пассажирских платформах.

Существующие меры по предотвращению производственного травматизма

Ежегодно ОАО «РЖД» реализует комплекс мероприятий по предупреждению и профилактике случаев производственного травмирования граждан.

Работа по профилактике несчастных случаев строится по следующим направлениям:

- организационные решения: проведение совместно с работниками линейных отделов полиции и ведомственной охраной рейдов по местам несанкционированного нахождения граждан, совместно с муниципальными органами власти — тематических мероприятий, в основном направленных на предупреждение детского травматизма, в том числе проведение лекций и бесед, направление соответствующих писем в образовательные учреждения, администрации предприятий, исполнительные органы, ГИБДД;
- информационные решения: информирование граждан об опасности при их нахождении в зоне движения поездов: плакаты, знаки, видеоролики, буклеты, сообщения на железнодорожных вокзалах и в поездах, привлечение средств массовой информации и пр.;
- технические решения: работа по строительству, оборудованию и ремонту пешеходных переходов, пешеходных мостов и тоннелей, ограждению зоны движения поездов и др.;
- правовые решения: предложения об изменении законодательства, о разработке нормативных правовых актов.

Для организации вышеуказанной деятельности ОАО «Российские железные дороги» разработано большое количество специальных вспомогательных материалов по профилактике производственного травматизма, включая детский травматизм, в том числе мультфильмы, видеоролики, буклеты [5, 6].

Особое внимание уделяется снижению смертности среди детей, в том числе предусматривается проведение следующих мероприятий:

- проведение курсов и тренингов в детских садах, школах, колледжах и вузах;
- ежемесячное проведение рейдов с представителями линейного управления (отдела) внутренних дел на транспорте (ЛОВД);

- личные беседы с теми, кто был замечен при нарушении правил безопасности;
- разработка четких стандартов и инструкций;
- введение систем санкций и штрафов.

Важными мероприятиями по снижению и предотвращению непроизводственных случаев на территории ОАО «РЖД» являются: установка металлических ограждений на платформах, перемещение кассовых пунктов в безопасную зону платформы, проведение практических занятий по безопасности с детьми, установка датчиков движения для контроля опасных зон.

Для предотвращения непроизводственного травматизма на объектах ОАО «РЖД» предусмотрена установка металлических ограждений (заборов) на платформах (рис. 1), что является важной мерой по предотвращению падения пассажиров на рельсы и повышению безопасности на железнодорожном транспорте.

Забор должен гармонично вписываться в общий дизайн платформы и не создавать негативного визуального впечатления.

Установка ограждений на платформах — важный шаг к повышению безопасности пассажиров на железнодорожном транспорте. В сочетании с другими мерами — например, обучением и информированием пассажиров — это позволяет существенно снизить риск несчастных случаев и создать более безопасную среду для всех пользователей железнодорожного транспорта.

Существенный фактор, влияющий на снижение травматизма, — это внедрение современных технологий, таких как установка вандалоустойчивых ограждений, устойчивых к механическим повреждениям. Это мероприятие способствовало снижению уровня травматизма.

В настоящее время в Сергиевом Посаде испытывают новые системы — противопешеходные



Рис. 1. Установка забора на платформе
(<https://mobile-review.com/articles/2013/japan-2013-2.shtml>)

покрытия, устанавливаемые в местах, где невозможно поставить ограждение. Разработанные компанией ВИС решения повысили безопасность передвижения [7].

Следующим важным мероприятием по предотвращению случаев непроизводственного травматизма на объектах ОАО «РЖД» является перенос касс на платформы (рис. 2).

Для улучшения доступа к вагонам и предотвращения несчастных случаев можно совместить указанные ограждения и кассы контроля билетов.

Таким образом, мы предотвратим падение людей с платформ на рельсы, сократим случаи проезда без билета (так называемых «зайцев») и снизим нагрузку на проводников-контролеров.

Большое значение для снижения уровня непроизводственного травматизма играют практические занятия с детьми [8–10].

Занятие-игра для детей, в которой воспитатель-учитель исполняет роль поезда, а дети исполняют роли пассажиров на платформах или станциях. Задача этой игры — научить детей пра-

вильно вести себя вблизи железнодорожных объектов и путей.

При разыгрывании ситуации на вокзале учитель раздает детям роли (бизнесмен, мама с ребенком, пожилой человек и т. п.). Затем учитель объявляет о прибытии поезда и называет время до отправления. Дети реагируют на информацию, а учитель наблюдает за их реакцией. У одного ребенка — «особая» роль: он заявляет, что перепутал платформу, и пытается выйти на пути. В это время учитель имитирует приближение поезда, который либо сбивает человека, либо тот успевает перебежать пути.

После игры проводится беседа преподавателя с детьми, в ходе которой обсуждаются вопросы о том, как следовало поступить, чтобы избежать несчастного случая.

В качестве еще одной игровой ситуации рассматривается переход через железнодорожные пути по настилам. Учитель исполняет роль поезда, а остальные дети выбирают роли — определяют, куда и зачем они направляются. Один из



Рис. 2. Размещение касс на платформе

(<https://travel.rambler.ru/news/47003808-sapsan-novogo-pokoleniya-zapustyat-mezhdu-moskvoy-i-peterburgom-v-2022-godu/>)

участников получает «особую» роль: при приближении поезда он должен испугаться и остановиться на путях. После того как дети реагируют на ситуацию (помогают или не помогают остановившемуся на путях), проводится обсуждение: стоило ли оказывать помощь, чем завершилась ситуация и какие действия были бы правильными в данных обстоятельствах.

Следующая игровая ситуация — «Зацепер». В этой игре выбирают двух участников: одного — в роли «зацепера», второго — в роли столба (негабаритного места) или второго поезда. Во время движения учитель и второй ребенок демонстрируют, что между поездами и стоящими негабаритными объектами остается мало места для человека. Первый ребенок имитирует падение и столкновение со вторым участником. Затем проводится разбор ошибок: дети самостоятельно объясняют, почему так делать нельзя и к каким последствиям это могло привести. Учитель корректирует ответы при необходимости и раздает памятки по безопасности.

Благодаря таким играм дети наглядно видят возможные последствия и учатся правильно вести себя в опасных ситуациях. В 2024 г. работники столичной магистрали провели обучение московских школьников по специально разработанной программе. Только за этот год уроки безопасности посетили более 600 столичных школьников.

Центры обучения оборудованы тренажерами и макетами. В них также имеются манекены, на которых школьники отрабатывают необходимые навыки — в том числе по оказанию первой медицинской помощи. Это позволяет в интерактивной форме показать, к чему приводят нарушения правил безопасного нахождения на железнодорожной инфраструктуре [10].

Одним из важных мероприятий по предотвращению производственных несчастных случаев является установка датчиков движения. Статистика фиксирует ситуации, когда человек при ухудшении самочувствия падал на рельсы, а охрана не сразу замечала это. Кроме того, чтобы не опоздать, люди иногда перепрыгивают через платформы — датчики помогают оперативно реагировать и на такие случаи.

Во избежание таких случаев на платформах устанавливаются датчики движения (рис. 3). При попадании «теплого» объекта в зону действия датчика поступает сигнал на пульт центра управления, после чего срабатывает сигнализация либо световой сигнал, указывающий на присутствие человека в зоне железнодорожных путей.

Заключение

Совершенствование системы защиты граждан от несчастных случаев вблизи железнодорожных путей — посредством ограждения опасных зон,

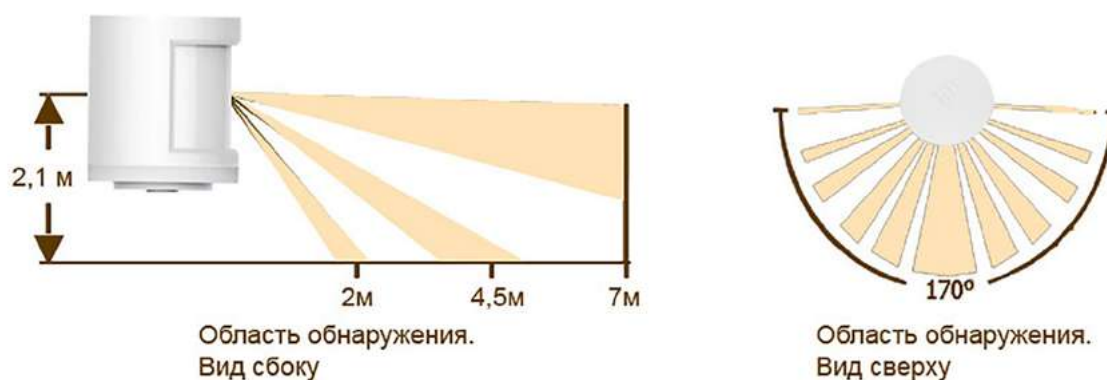


Рис. 3. Схема датчиков движения

(<https://security-club.ru/articles/datchik-dvizheniya-xiaomi-occupancy-sensor/>)

разработки новых форм обучения и внедрения инновационных технологий — является важным шагом в обеспечении безопасности и комфорта пассажиров.

В ОАО «РЖД» реализуется инвестиционный проект «Предупреждение травматизма граждан на объектах инфраструктуры ОАО «РЖД»».

В рамках проекта ведется строительство пешеходных переходов, расположенных на одном уровне с железнодорожными путями и оборудованных световой и звуковой сигнализацией, а также установка ограждений вдоль железнодорожного полотна. Эти меры направлены на снижение риска травмирования граждан при переходе через железнодорожные пути и предотвращение несанкционированного доступа на объекты инфраструктуры [10].

Список источников

1. Российская газета: офиц. сайт. — URL: <https://rg.ru/2025/03/04/mintrans-uroven-detskogo-travmatizma-na-zheleznoj-doroge-rastet.html> (дата обращения: 03.04.2025).
2. Распоряжение ОАО «РЖД» от 26.12.2005 № 2265р «Об утверждении Положения об организации работы по профилактике непроизводственного травматизма, проведения служебного расследования и учета в ОАО «РЖД» случаев травмирования граждан».
3. Беломесцева О. В. Основные факторы непредумышленного травматизма на объектах железнодорожной инфраструктуры / О. В. Беломесцева, Л. В. Столбина // Проблемы правоохранительной деятельности. — 2020. — № 3. — С. 79–84.
4. Канонин Ю. Н. Предупреждение непроизводственного травматизма в зоне железной дороги / Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров, О. Н. Аниськова // Безопасность жизнедеятельности (БЖД). — 2022. — № 2(254). — С. 14–18.
5. Анисимова Н. А. Некоторые проблемы безопасного поведения на объектах железнодорожного транспорта у обучающихся образовательных организаций / Н. А. Анисимова // Уголовно-процессуальная охрана прав и законных интересов несовершеннолетних. — 2022. — № 1(9). — С. 5–9.
6. Сосновская Ю. Н. Проблемные вопросы, связанные с мониторингом информационной среды как методом предупреждения детского травматизма / Ю. Н. Сосновская, Э. В. Маркина // Вестник экономической безопасности. — 2019. — № 2. — С. 266–269.
7. Газета «Вперед»: офиц. сайт. — URL: <https://vperedsp.ru/novosti/457-nomer-089-16258-ot-15-11-2023/29178-na-zheleznodorozhnykh-putyakh-vokzala-v-sergievom-posade-ustanovili-protivopeshekhodnye-maty> (дата обращения: 17.11.2023).
8. Деловая Россия: офиц. сайт. — URL: <https://deloros.ru/press-centr/novosti/novosti-o-nas/delorossy-otseniliresheniya-dlya-snizheniya-travmatizma-na-obektakh-rzhd/> (дата обращения: 25.07.2025).
9. Открытое акционерное общество «Российские железные дороги»: офиц. сайт. — URL: <https://mzd.rzd.ru/ru/11125/page/2452802?id=290806> (дата обращения: 23.06.2025).
10. Открытое акционерное общество «Российские железные дороги»: офиц. сайт. — URL: <https://sr2021.rzd.ru/ru/social-aspect/occupational-industrial-safety/non-work-related-injuries> (дата обращения: 26.04.2025).

Дата поступления: 27.09.2025

Решение о публикации: 23.10.2025

Контактная информация:

ИОСТ Наталья Ивановна — магистрант;
pretty.iost@mail.ru

СУВОРОВА Ольга Константиновна — канд. физ.-мат. наук, доц.; suolko@gmail.com

Prevention of Non-Occupational Injuries at the Russian Railways JSC

N. I. Iost, O. K. Suvorova

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

For citation: Iost N. I., Suvorova O. K. Prevention of Non-Occupational Injuries at the Russian Railways JSC // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1045–1052. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1045-1052

Summary

Purpose: To identify the key factors that contribute to the high rate of non-work-related injuries at the facilities of Russian Railways JSC. To determine the most effective strategies for decreasing the occurrence of non-occupational injuries. **Methods:** A study was carried out to analyze statistical data from Russian Railways concerning the prevalence of non-work-related injuries and the factors that contribute to the elevated injury rates at the company's facilities. Additionally, a comparative analysis was performed to evaluate the effectiveness of initiatives designed to decrease the occurrence of non-occupational accidents. **Results:** The analysis conducted has identified the causes of non-occupational injuries within Russian Railways Company and highlighted the primary categories of factors influencing the incidence of these injuries. These categories include personal, social, organizational, physical, and psychological factors. A review of current preventive measures has been conducted, leading to recommendations aimed at decreasing the rates of non-occupational injuries. It has been established that reducing the rates of non-occupational injuries requires a comprehensive approach, which encompasses not only educational and informational initiatives for the public but also implementation of new technologies and safety management practices. The proposed measures to prevent non-occupational incidents at Russian Railways JSC facilities have also been outlined. **Practical significance:** The findings of the research are significant in terms of reducing the incidence of non-occupational injuries within the Russian Railways company.

Keywords: Non-occupational injuries, factors, preventive measures, recommendations.

References

1. *Rossiyskaya gazeta* [Russian Gazette]. Available at: <https://rg.ru/2025/03/04/mintrans-uroven-detskogo-travmatizma-na-zheleznorodnoy-doroge-rastet.html> (accessed: April 3, 2025). (In Russian)
2. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 26.12.2005 № 2265r "Ob utverzhdenii Polozheniya ob organizatsii raboty po profilaktike neproizvodstvennogo travmatizma, provedeniya sluzhebnogo rassledovaniya i ucheta v OAO "RZhD" sluchaev travmirovaniya grazhdan"* [Order of JSC Russian Railways dated 26.12.2005 № 2265r "On approval of the Regulation on the organization of work to prevent non-occupational injuries, conducting an official investigation and recording of cases of injury to citizens at JSC Russian Railways"]. (In Russian)
3. Belomestseva O. V., Stolbina L. V. Osnovnye faktory nepredumyshlennogo travmatizma na ob'ektakh zheleznodorozhnoy infrastruktury [Main factors of unintentional injuries at railway infrastructure facilities]. *Problemy pravookhranitel'noy deyatel'nosti* [Problems of law enforcement]. 2020, Iss. 3, pp. 79–84. (In Russian)
4. Kanonin Yu. N., Tikhomirov O. I., Anis'kova O. N. Preduprezhdenie neproizvodstvennogo travmatizma v zone zheleznoy dorogi [Prevention of non-work-related injuries in the railway zone]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti (BZhD)* [Life Safety (BZhD)]. 2022, Iss. 2 (254), pp. 14–18. (In Russian)
5. Anisimova N. A. Nekotorye problemy bezopasnogo povedeniya na ob'ektakh zheleznodorozhnogo transporta u obuchayushchikhsya obrazovatel'nykh organizatsiy [Some

problems of safe behavior on railway transport facilities among students of educational organizations]. *Ugolovno-protsessual'naya okhrana prav i zakonnykh interesov nesovershennoletnikh* [Criminal procedural protection of the rights and legitimate interests of minors]. 2022, Iss. 1(9), pp. 5–9. (In Russian)

6. Sosnovskaya Yu. N., Markina E. V. Problemnye voprosy, svyazannye s monitoringom informatsionnoy sredy kak metodom preduprezhdeniya detskogo travmatizma [Problematic issues related to monitoring the information environment as a method of preventing child injuries]. *Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti* [Bulletin of Economic Security]. 2019, Iss. 2, pp. 266–269. (In Russian)

7. *Gazeta "Vpered"* [Newspaper "Vpered"]. Available at: <https://vperedsp.ru/novosti/457-nomer-089-16258-ot-15-11-2023/29178-na-zheleznodorozhnykh-putyakh-vokzala-v-sergievom-posade-ustanovili-protivopeshekhodnye-maty> (accessed: November 17, 2023). (In Russian)

8. *Delovaya Rossiya* [Business Russia]. Available at: <https://deloros.ru/press-centr/novosti/novosti-o-nas/>

deloros.ru/press-centr/novosti/novosti-o-nas/ delorossy-otsenili-resheniya-dlya-snizheniya-travmatizma-na-obektakh-rzhd/ (accessed: July 25, 2025). (In Russian)

9. *Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo "Rossiyskie zheleznye dorogi"* [Open Joint Stock Company "Russian Railways"]. Available at: <https://mzd.rzd.ru/ru/11125/page/2452802?id=290806> (accessed: June 23, 2025). (In Russian)

10. *Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo "Rossiyskie zheleznye dorogi"* [Open Joint Stock Company "Russian Railways"]. Available at: <https://sr2021.rzd.ru/ru/social-aspect/occupational-industrial-safety/non-work-related-injuries> (accessed: April 26, 2024). (In Russian)

Received: September 27, 2025

Accepted: October 23, 2025

Author's information:

Natalya I. IOST — Master's Degree Student;
pretty.iost@mail.ru

Olga K. SUVOROVA — PhD in Physics and Mathematics,
Associate Professor; suolko@gmail.com

УДК 504.06

Приоритетные направления переработки отвальной породы угольных шахт для получения редких металлов

А. В. Харламова¹, Е. И. Верех-Белоусова²

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

²Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Российская Федерация, Луганская Народная Республика, 291034, Луганск, квартал Молодежный, 20А

Для цитирования: Харламова А. В., Верех-Белоусова Е. И. Приоритетные направления переработки отвальной породы угольных шахт для получения редких металлов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1053–1059. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1053-1059

Аннотация

Цель: Исследовать и обосновать возможность получения редких металлов из отвальной породы угольных шахт Луганской Народной Республики. Исследовать минералогический состав складированных отходов угольных шахт и биохимические процессы, протекающие в них. **Методы:** Проведение эксперимента по биохимическому кислотному выщелачиванию образцов отвальной породы с применением культуры сульфатредуцирующих микроорганизмов *Th. Ferrooxidans*. Получение чистой культуры микроорганизмов *Th. Ferrooxidans* с использованием общепринятых микробиологических методик. **Результаты:** Разработан метод, и предложена технология получения редких металлов галлия и германия из отвальной породы угольных шахт с использованием естественных процессов формирования серной кислоты в породе. В ходе эксперимента эффективность выщелачивания германия составила 1,6 мг/кг породы, а галлия — до 2 мг/кг отвальной породы. Это позволяет рассматривать подобные отходы как потенциальное металлоносное сырье, а для региона — получить положительный экологический и экономический эффект. **Практическая значимость:** Предложенный способ дает возможность утилизировать отвальную породу со снижением негативного действия отвалов на окружающую среду и получением редких металлов.

Ключевые слова: Углепородные отвалы, редкие металлы, алюминий, германий, галлий, биохимическое выщелачивание, серная кислота, бактерии *Th. Ferrooxidans*.

Введение

Горнодобывающая отрасль в Российской Федерации имеет одно из ключевых стратегических значений для экономики страны. Занимая лидирующие позиции в мире по запасам угля и других полезных ископаемых, Россия выступает важным экспортером на международном рынке. Однако интенсификация угледобычи влечет ряд негативных последствий для окружающей среды. В настоящее время в России и в мире сложилась критическая ситуация с образованием

и накоплением промышленных отходов, в том числе в горной промышленности. Крупнотоннажные отходы — неотъемлемая часть процесса угледобычи. Они складываются на территории шахт и оказывают существенное негативное воздействие на окружающую среду. Для его минимизации необходимо утилизировать отвальную породу. Наиболее экономически перспективный способ утилизации — использование отвальной породы в качестве сырьевого ресурса. Это позволит повысить экономическую эффективность

и снизить вред, наносимый природе. Один из основных путей максимально полного использования отходов — внедрение малоотходных технологий. Однако переработка отходов зачастую характеризуется низкой экономической эффективностью. Поэтому отходы рассматриваются как альтернативный источник сырья лишь в тех случаях, когда это одновременно экологически обосновано и экономически целесообразно.

Донецкая и Луганская Народные Республики, как промышленно развитые регионы, на сегодняшний день имеют ряд проблем, связанных с утилизацией промышленных отходов. В республиках практически отсутствуют специализированные предприятия по утилизации или нейтрализации отходов производства. Основной их объем приходится на предприятия добычи и обогащения угля. Так, в Луганской Народной Республике насчитывается около 556 породных отвалов, из которых около 70 горят [1]. Такие крупнотоннажные отходы создают серьезную антропогенную нагрузку на экологическое состояние региона, загрязняя продуктами ветровой и водной эрозии прилегающие к отвалам территории.

Современные исследователи в научных трудах изучают различные методы переработки отходов добычи и обогащения угля. В частности, в работах [2–8] предлагается использовать отвальную породу для производства строительных материалов и удобрений, а также в качестве сырья для извлечения металлов. Поскольку проблема утилизации крупнотоннажных отходов угледобычи до сих пор не решена, она остается актуальной.

Одним из наиболее перспективных направлений утилизации или частичной переработки таких отходов может выступать использование их для получения редких элементов (металлов), а также производства строительных материалов для промышленного и дорожного строительства.

Цель работы состояла в исследовании возможности получения редких металлов из отваль-

ной породы угольных шахт Луганской Народной Республики.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ минералогического состава отвальной породы показал, что в ней преобладают минералы кремния, железа и алюминия, а также изоморфно замещенные редкоземельные и ценные металлы [9, 7].

В качестве объектов исследований были выбраны четыре породных отвала угольных шахт, которые располагаются на территории Луганской Народной Республики. Был проведен спектральный анализ образцов отвальной породы, по результатам которого установлено присутствие высокого содержания редких и ценных металлов, а превышение кларков и приближение к минимальной промышленной концентрации приходится на галлий и германий. Согласно источникам [10–12], отмечается постоянное присутствие германия в углях, при этом его содержание может быть повышено в сульфидных и силикатных минералах ($> 1\%$). Поскольку галлий имеет сходство кристаллохимических, химических и атомных свойств с железом, цинком и алюминием, значительная его часть рассеяна в каменных углях и минералах [11–13]. В связи с этим представляет интерес возможность использования отвальной породы угольных шахт в качестве сырьевого ресурса для получения галлия и германия методом биохимического выщелачивания, что и предложено в данной работе.

После отсыпки отвальной породы в насыпи (терриконы) внутри них запускаются непрерывные биохимические и геохимические процессы преобразования, сопровождающиеся формированием и выделением новых минералов (новообразований). Ключевую роль в этих гео- и биохимических процессах играет серная кислота. Минеральные сернистые соединения представляют собой совокупность сульфидной серы (FeS_2)

и сульфатной серы (FeSO_4 , CaSO_4 и др.). Серная кислота, преобразующая минералы отвалных пород, может иметь как геохимическое, так и биохимическое происхождение [9]. Если отвальная порода увлажняется кислыми шахтными водами перед отсыпкой на поверхность, в уже складированной массе запускаются процессы развития бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* (Th. ferrooxidans). Основное место их обитания — кислые воды сульфидных руд угольных месторождений. При благоприятных для бактерий условиях на каждый миллилитр геохимически производимой серной кислоты приходится 4 мл, образуемой в результате их жизнедеятельности [9].

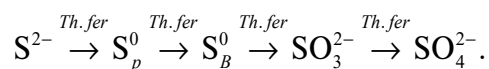
Кроме того, если доля токсичных сульфидных пород в отвале превышает 20 %, такая отвальная порода приобретает ряд свойств, оказывающих значительное негативное влияние на прилегающие территории. Повышенная активная кислотность породы приводит к росту содержания подвижных форм тяжелых металлов, сульфатов алюминия и железа, а также обменного водорода.

С капиллярной влагой в породу поступают растворы серной кислоты, вследствие чего увеличивается концентрация подвижных форм ценных металлов, алюминия, изоморфно замещенных редкоземельных металлов и кремниевой кислоты [9, 14].

Такое геохимическое преобразование отвалной породы зачастую представляет собой необратимый процесс, а его негативные последствия для окружающей среды весьма значительны. Однако эти изменения можно эффективно использовать для естественного биохимического выщелачивания металлов из отвалной породы.

Th. ferrooxidans — грамотрицательная палочковидная бактерия, аэроб, большинство штаммов относится к облигатным автотрофам, для которых оптимум кислотности среды лежит в диапазоне 2,0–2,5. Как источник энергии для Th. ferrooxidans необходимы: тиосульфат, сера, сульфат- и суль-

фидные ионы (S^{2-} , SO_4^{2-}), соли двухвалентного железа, окисляют Fe^{2+} к Fe^{3+} [9, 15]. Схема окисления бактериями сульфидной серы до сульфат-иона выглядит следующим образом [9]:



Кислотность среды изменяется под действием микроорганизмов, которые окисляют соответствующее количество сульфидной серы.

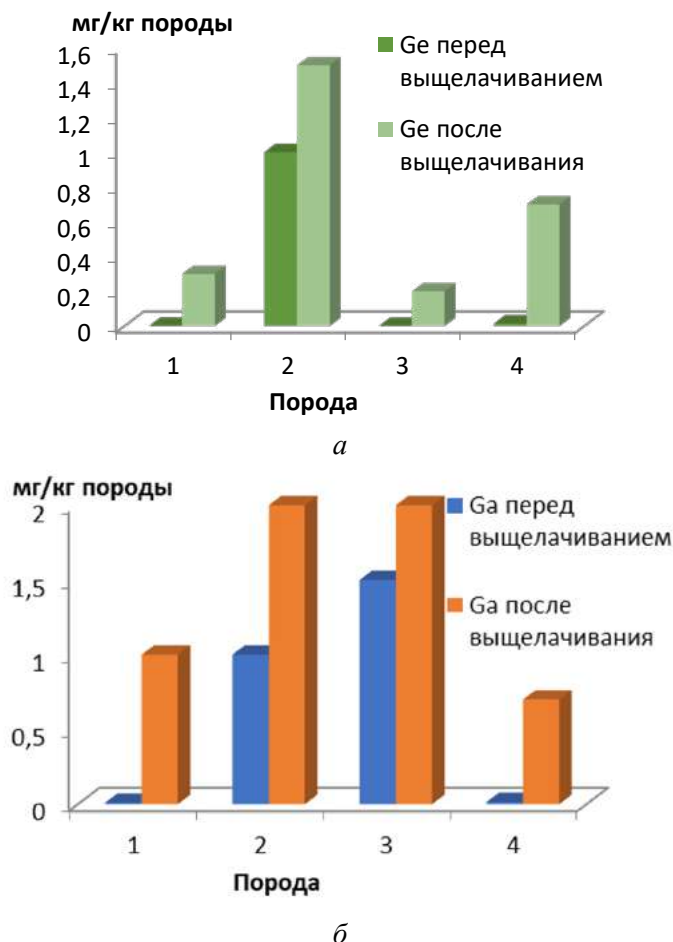
В лабораторных условиях был проведен процесс биохимического выщелачивания германия и галлия (Ge, Ga) из отвалной породы. Культура микроорганизмов Th. ferrooxidans выделялась из образцов согласно общепринятым микробиологическим методикам [16] на среду Сильвермана и Ландгрена [9, 16]. Затем однократно орошались образцы породы растворами выделенной чистой культуры. Содержание перешедших в раствор германия и галлия определялось на восьмые сутки проведения опыта по их выщелачиванию (рисунок).

На основании полученных результатов установлено, что происходит выщелачивание изоморфно замещенных металлов (Ge, Ga) из отвалной породы угольных шахт за счет биохимической активности микроорганизмов Th. ferrooxidans. Следует отметить, что велика вероятность замещения германием солей двухвалентного железа в сульфидных минералах породы и галлием солей трехвалентного алюминия и двухвалентного железа в алюмосиликатных соединениях. Эффективность проведенного выщелачивания германия в опыте достигла 1,6 мг/кг породы, а галлия — до 2 мг/кг отвалной породы.

По результатам проведенного исследования предложена технологическая схема получения редких металлов (Ga, Ge) путем кучного биохимического бактериального выщелачивания из отвалной породы угольных шахт.

Метод включает следующие этапы:

1. Складирование добытой отвалной породы в кучи на специально оборудованных площадках.



Результаты биохимического выщелачивания:

а — германия, *б* — галлия: 1 — сильный метаморфизм (отвал шахты г. Свердловска), 2 — сильный метаморфизм (отвал шахты г. Антрацита), 3 — средний метаморфизм (отвал шахты г. Луганска), 4 — слабый метаморфизм (отвал шахты г. Лисичанска)

2. Орошение куч подготовленными бактериальными растворами.

Для улучшения аэрации кучи формируют послойно, отсыпая отвальную породу, отсортированную по фракциям.

Бактерии повышают кислотность породы за счет выделения серной кислоты, что приводит к выщелачиванию изоморфно замещенных редких металлов, включая германий и галлий.

Ключевыми факторами, определяющими скорость и эффективность процесса выщелачивания, являются:

- общее количество сульфидной серы;
- аэрация отвальной породы;

— гранулометрический состав породы;

— степень метаморфизма породы;

— концентрация бактериальных клеток в растворе;

— высота рудной кучи.

Существенным экономическим преимуществом является возможность использования под промплощадки территорий закрытых шахт. Такие площадки обладают рядом достоинств:

— сохранена транспортная и промышленная инфраструктура;

— близкое расположение к шахте породных отвалов добычи и обогащения угля.

Выводы

Внедрение современных технологий утилизации промышленных отходов позволит повысить уровень экологической и экономической безопасности страны. Важным этапом утилизации отвальной породы угольных шахт является максимальное извлечение всех полезных свойств, присущих данному виду промышленных отходов. Поэтому предложенная схема кучного бактериального выщелачивания редких металлов (германия и галлия) из грунтов породных отвалов является обоснованной: она позволяет при небольших материальных затратах минимизировать негативное воздействие породы на окружающую среду и получить ценные металлы. Однако основной проблемой предложенных мероприятий по переработке отвальной породы угольных шахт является расчет себестоимости промышленного получения металлов таким способом. Полученные результаты требуют дальнейших исследований в этой области для установления более точных параметров и зависимостей предложенного процесса выщелачивания, а также для оценки экономической эффективности.

Список источников

1. Луганщина — край нашей любви и надежды. По материалам годового отчета состояния окружающей среды в Луганской области в 2012 году / Под ред. А. О. Арапова. — Луганск, 2013. — 187 с.
2. Баталин Б. С. Строительная керамика из терриконников Кизеловского угольного бассейна / Б. С. Баталин, Т. А. Белозерова, М. Ф. Гайдай // *Стекло и керамика*. — 2014. — № 3. — С. 8–10.
3. Шпирт М. Я. Использование твердых отходов добычи и переработки углей / М. Я. Шпирт, В. Б. Артемьев, С. А. Силютин. — М.: «Горное дело», ООО «Киммерийский центр», 2013. — 432 с.
4. Shpirt M. Ya. Ecological problems caused by mining and processing with suggestions for remediation / M. Ya. Shpirt, A. K. M. Rainbow. — Millpress, 2006. — 162 p.
5. Nifantov B. F. Mineral resources of Kuzbass for complex deposits providing realization of innovative technologies of deep re-processing of coal and ores / B. F. Nifantov // *Twenty-fifth Annual International Pittsburg coal Conference*. Sept. 29 — Oct. 2, 2008. Pittsburg, Pensilvania. — 2008. — Pp. 20–23.
6. Буравчук Н. И. Использование материалов из горелых пород шахтных отвалов в дорожном строительстве / Н. И. Буравчук, О. В. Гурьянова, Г. Н. Пак // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки*. — 2014. — № 6. — С. 75–80.
7. Зубова Л. Г. Получение металлов из терриконов угольных шахт Донбасса: монография / Л. Г. Зубова, А. Р. Зубов, Е. И. Верех-Белоусова, Н. В. Олейник. — Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. — 144 с.
8. Гайдай М. Ф. Оценка негативного воздействия терриконинов на экологическую ситуацию в угледобывающих районах и пути его снижения / М. Ф. Гайдай, Я. И. Вайсман // *Экологические системы и приборы*. — 2015. — Вып. 12. — С. 11–21.
9. Зборщик М. П. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений / М. П. Зборщик, В. В. Осокин. — Донецк: ДонГТУ, 1996. — 178 с.
10. Поваренных М. Ю. Аутигенная редкометалльная минерализация в Ge-угольных месторождениях Приморья: проявление нового природного феномена — избирательной сепарации редкоземельных элементов / М. Ю. Поваренных, М. Я. Шпирт, А. В. Кнотько // *Материалы конференции «Годичное собрание РМО 2014. Минералогия во всем пространстве сего слова»*. — СПб.: Российское минералогическое общество, 2014. — С. 57–61.
11. Yudovich Ya. E. Coal inclusions in sedimentary rocks: a geochemical phenomenon / Ya. E. Yudovich // *International Journal of Coal Geology*. — 2003. — Vol. 56. — № 3/4. — Pp. 203–222.
12. Клер В. Р. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Геохимия элементов / В. Р. Клер, Г. А. Волкова, Е. М. Гурвич. — М.: Наука, 1987. — 237 с.

13. Дымов А. И. Аналитическая химия галлия (Серия «Аналитическая химия элементов») / А. И. Дымов. — М.: Наука, 1978. — 256 с.

14. Смирный М. Ф. Экологическая безопасность территориальных ландшафтов Донбасса: монография / М. Ф. Смирный, Л. Г. Зубова, А. Р. Зубов. — Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2006. — 232 с.

15. Кузнецов С. И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд / С. И. Кузнецов, Г. И. Каравайко. — М.: Наука, 1972. — 248 с.

16. Аркадьева З. А. Промышленная микробиология / З. А. Аркадьева; под общ. ред. Н. С. Егорова. — М.: Высшая школа, 1989. — 686 с.

Дата поступления: 27.08.2025

Решение о публикации: 14.10.2025

Контактная информация:

ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна — канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru

ВЕРЕХ-БЕЛОУСОВА Екатерина Иосифовна — канд. техн. наук, доц.; kate3152@yandex.ru

Key Technologies for Treating Coal-Mining Wastes And Extracting Rare Earth Metals.

A. V. Kharlamova¹, E. I. Verekh-Belousova²

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

²Lugansk Vladimir Dahl State University, 20a, Molodezhny kvartal., Lugansk, 91034, Lugansk People's Republic, Russian Federation

For citation: Kharlamova A. V., Verekh-Belousova E. I. Key Technologies for Treating Coal-Mining Wastes and Extracting Rare Earth Metals // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1053–1059. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1053-1059

Summary

Purpose: To investigate and validate the feasibility of extracting rare earth metals from coal-mining byproducts in the Lugansk People's Republic. This involves analyzing the mineralogical composition of accumulated waste at coal mines and examining the biochemical processes taking place within. **Methods:** Conducting experiments on biochemical acid leaching of waste rock samples using a culture of sulfate-reducing Thioferrooxidans microorganisms. Additionally, a pure culture of Thioferrooxidans microorganisms will be obtained through established microbiological techniques. **Results:** A method has been developed and a technology has been proposed for obtaining the rare metals of gallium and germanium from coal-mine waste rock through the natural processes of sulfuric acid formation within the rock. Experimental results indicated that the leaching efficiency of germanium reached 1.6 mg/kg of rock while gallium achieved up to 2 mg/kg of waste rock. This suggests that such waste can be regarded as a potential source of metal-bearing raw materials, providing both environmental and economic benefits for the region. **Practical significance:** The proposed method will facilitate the utilization of waste rock, thereby minimizing the adverse environmental impacts associated with waste and promoting the production of rare earth metals.

Keywords: Coal waste deposits, rare metals, aluminum, germanium, gallium, biochemical leaching, sulfuric acid, Thioferrooxidans bacteria.

References

1. Arapov A. O. (ed.) *Luganshchina — kray nashey lyubvi i nadezhdy. Po materialam godovogo otcheta sostoyaniya okruzhayushchey sredy v Luganskoy oblasti v 2012 godu* [Luganshchina — the land of our love and hope. Based on the materials of the annual report on the state of the environment in the Lugansk region in 2012]. Lugansk, 2013, 187 p. (In Russian)
2. Batalin B. S., Belozero T. A., Gayday M. F. Stroitel'naya keramika iz terrikonnikov Kizelovskogo ugol'nogo basseyna [Construction ceramics from spoil heaps of the Kizel coal basin]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics]. 2014, Iss. 3, pp. 8–10. (In Russian)
3. Shpirt M. Ya., Artem'ev V. B., Silyutin S. A. *Ispol'zovanie tvyordykh otkhodov dobychi i pererabotki ugley* [Use of solid waste from coal mining and processing]. Moscow: "Gornoe delo" Publ., OOO "Kimmeriyskiy tsentr" Publ., 2013, 432 p. (In Russian)
4. Shpirt M. Ya., Rainbow A. K. M. Ecological problems caused by mining and processing with suggestions for remediation. Millpress, 2006, 162 p.
5. Nifantov B. F. Mineral resources of Kuzbass for complex deposits providing realization of innovative technologies of deep re-processing of coal and ores. Twenty-fifth Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 29 — October 2, 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, 2008, pp. 20–23.
6. Buravchuk N. I., Gur'yanova O. V., Pak G. N. *Ispol'zovanie materialov iz gorelykh porod shakhtnykh otvalov v dorozhnom stroitel'stve* [Use of materials from burnt rock of mine dumps in road construction]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences]. 2014, Iss. 6, pp. 75–80. (In Russian)
7. Zubova L. G., Zubov A. R., Verekh-Belousova E. I., Oleynik N. V. *Poluchenie metallov iz terrikonov ugol'nykh shakht Donbassa: monografiya* [Extraction of metals from coal mine spoil heaps in Donbass: monograph]. Lugansk: VNU im. V. Dal'ya Publ., 2012, 144 p. (In Russian)
8. Gayday M. F., Vaysman Ya. I. Otsenka negativnogo vozdeystviya terrikonnikov na ekologicheskuyu situatsiyu v ugledobyvayushchikh rayonakh i puti ego snizheniya [Assessment of the negative impact of spoil heaps on the ecological situation in coal mining areas and ways to reduce it]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices]. 2015, Iss. 12, pp. 11–21. (In Russian)
9. Zborshchik M. P., Osokin V. V. *Predotvrashchenie ekologicheskikh vrednykh proyavleniy v porodakh ugol'nykh mestorozhdeniy* [Prevention of ecologically harmful manifestations in coal deposit rocks]. Donetsk: DonGTU Publ., 1996, 178 p. (In Russian)
10. Povarennykh M. Yu., Shpirt M. Ya., Knot'ko A. V. Autigennaya redkometall'naya mineralizatsiya v Ge-ugol'nykh mestorozhdeniyakh Primor'ya: proyavlenie novogo prirodnogo fenomena — izbiratel'noy separatsii redkozemel'nykh elementov [Autigenic rare-metal mineralization in Ge-coal deposits of Primorye: manifestation of a new natural phenomenon — selective separation of rare earth elements]. *Materialy konferentsii "Godichnoe sobranie RMO 2014. Mineralogiya vo vsem prostranstve sego slova"* [Proceedings of the Conference "Annual Meeting of the Russian Mineralogical Society 2014. Mineralogy in the Whole Space of This Word"]. Saint Petersburg: Rossiyskoe mineralogicheskoe obshchestvo Publ., 2014, pp. 57–61. (In Russian)
11. Yudovich Ya. E. Coal inclusions in sedimentary rocks: a geochemical phenomenon. *International Journal of Coal Geology*. 2003, vol. 56, Iss. 3/4, pp. 203–222.
12. Kler V. R., Volkova G. A., Gurvich E. M. *Metallogeniya i geokhimiya uglenosnykh i slantsesoderzhashchikh tolshch SSSR. Geokhimiya elementov* [Metallogeny and geochemistry of coal-bearing and shale-bearing strata of the USSR. Geochemistry of elements]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 237 p. (In Russian)
13. Dymov A. I. *Analiticheskaya khimiya galliya (Seriya "Analiticheskaya khimiya elementov")* [Analytical chemistry of gallium (Series "Analytical Chemistry of Elements")]. Moscow: Nauka Publ., 1978, 256 p. (In Russian)
14. Smirnyy M. F., Zubova L. G., Zubov A. R. *Ekologicheskaya bezopasnost' terrikonovykh landshaftov Donbassa: monografiya* [Ecological safety of spoil heap landscapes in Donbass: monograph]. Lugansk: VNU im. V. Dal'ya Publ., 2006, 232 p. (In Russian)
15. Kuznetsov S. I., Karavayko G. I. *Rol' mikroorganizmov v vyshchelachivaniy metallov iz rud* [Role of microorganisms in metal leaching from ores]. Moscow: Nauka Publ., 1972, 248 p. (In Russian)
16. Arkad'eva Z. A.; Egorov N. S. (ed.). *Promyshlennaya mikrobiologiya* [Industrial microbiology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1989, 686 p. (In Russian)

Received: August 27, 2025

Accepted: October 14, 2025

Author's information:

Alina V. KHARLAMOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; alavina@yandex.ru

Ekaterina I. VEREKH-BELOUSOVA — PhD
in Engineering, Associate Professor; kate3152@yandex.ru

УДК 691.32

Наследственность показателей качества бетона как фактор эффективного контроля

Д. А. Черепанова

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

Для цитирования: Черепанова Д. А. Наследственность показателей качества бетона как фактор эффективного контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1060–1072. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1060-1072

Аннотация

Цель: Определить факторы системы контроля качества бетона в контексте всего жизненного цикла зданий и сооружений, которые не позволяют гарантировать прочность бетона при сжатии при условии удовлетворительных результатов контроля; разработать предложения, способные гарантировать заложенный уровень обеспеченности прочности бетона. **Методы:** На основе сравнительного анализа данных, нормативных требований и научных публикаций с применением метода дерева отказов исследованы взаимосвязи между факторами системы контроля и отказами бетонных и железобетонных конструкций. Оценка состояния системы контроля (как сдерживающего фактора развития) базируется на результатах экспериментально-теоретических исследований автора. **Результаты:** Показаны основные этапы и уровни в системе контроля качества бетона в контексте всего жизненного цикла зданий и сооружений. Установлены взаимосвязи между отказом бетона в конструкции и допустимыми погрешностями методов и методик контроля прочности бетона при сжатии. Разработано «дерево отказов» для конструкции из бетона (железобетона) в контексте факторов системы контроля. Выявлено влияние количества варьируемых факторов системы контроля в обеспечении эффективной комбинации параметров контроля и достоверности получаемых результатов для гарантии заданного уровня обеспеченности прочности. Определены составляющие (инструментальная, методологическая, субъективная) суммарной погрешности стандартных методов контроля прочности (разрушающих и неразрушающих). **Практическая значимость:** Обоснована необходимость внедрения этапа проектирования контроля непосредственно под конкретный объект, что позволит без глобальных изменений в системе контроля снизить влияние неоднородности за счет устранения слабых мест в системе контроля (учета влияния рассмотренных факторов), которые не позволяют получать достоверную информацию о реальном значении прочности бетона в конструкции.

Ключевые слова: Контроль качества, прочность при сжатии, погрешность, дерево отказов, надежность, методы контроля прочности, форма и размер образцов.

Введение

Основной задачей контроля качества бетона является обеспечение возможности гарантировать уровень его неразрушимости в конструкции за счет установления его реальных характеристик в конструкции на протяжении всего жизненного цикла зданий и сооружений. Однако принципы действующей системы контроля не всегда

позволяют своевременно выявлять и устранять, насколько это возможно, причины, приводящие к отказам и авариям на строительных объектах, и приводят к конфликту интересов поставщика и потребителя [1]. Это происходит из-за неоднородности бетона и погрешностей методик и методов контроля [2–4].

В целях исключения влияния вариативности прочности бетона при сжатии определен ряд правил ее контроля [5–7]. Статистический подход на разных этапах контроля наряду со стандартизованностью подходов и методов является основой исключения влияния изменчивости свойств бетона на надежность возводимых конструкций [8]. Надежность должна обеспечиваться выполнением условия, что суммарный резерв прочности при стечении всех неблагоприятных факторов будет больше суммарного нагрузочного эффекта на протяжении всего срока его планируемой эксплуатации [9, 10].

На этапе проектирования реализация данного условия обеспечивается расчетом требуемого запаса прочности исходя из конкретных внешних и внутренних воздействий при строительстве конкретного объекта в конкретных условиях, с учетом условий и режимов будущей эксплуатации здания, возможности их изменчивости, а также с учетом вариативности и деградации со временем свойств строительных материалов [9, 11]. Однако для обеспечения надежности на заложенном при проектировании уровне необходимо знать действительные характеристики материала, которые, несмотря на большой объем экспериментальных данных и развитие программных средств прогнозирования, определить с достаточным уровнем точности по-прежнему затруднительно [12].

В связи с этим актуальной задачей является повышение качества контроля. Это возможно за счет обеспечения наследственности показателей качества бетона на всех этапах жизненного цикла зданий и сооружений. Для этого требуется снижение всех видов погрешностей в системе контроля, так как неэффективно создавать материал с требуемыми свойствами, если эти свойства невозможно однозначно оценить и, соответственно, применить материал (например, высокопрочные бетоны).

Методы

В рамках исследования произведен анализ основной нормативной документации в области контроля качества бетона [5–9, 13–22], выделены и проиллюстрированы основные этапы и направления в системе контроля в контексте жизненного цикла зданий и сооружений. На основе сравнительного исследования существующих данных, норм и научных публикаций с помощью метода «анализ дерева отказов» определены и проиллюстрированы взаимосвязи между отказом бетона в конструкции и допустимыми погрешностями методов и методик контроля прочности бетона при сжатии.

Результаты

Из-за недостаточного уровня достоверности получаемых результатов в связи с отсутствием наследственности показателей прочности бетона при сжатии на разных этапах жизненного цикла зданий и сооружений потенциал бетона используется неэффективно. При назначении расчетных сопротивлений прочность снижается дважды: при учете коэффициента вариации прочности с учетом требуемого уровня обеспеченности 0,95 (1) [23] и при введении коэффициента надежности (1,3 для тяжелого бетона), который учитывает возможные отклонения фактических свойств бетона от заданных в проекте значений, а также возможные погрешности при расчетах [20].

$$B = R_m (1 - 1,64 \cdot V_m), \quad (1)$$

где B — класс бетона по прочности;

R_m — среднее значение временного сопротивления бетона сжатию, установленное при испытании стандартных кубов;

V_m — коэффициент вариации прочности бетона в партии.

Однако объем накопленных данных и развитие программных комплексов, которые позволили

совершенствовать подходы по подбору состава бетона и проектированию/прогнозированию его свойств, обеспечивать точное дозирование компонентов, по-прежнему не позволяют в достаточной степени влиять на изменчивость бетона внутри изделия. Сложность решения этой проблемы состоит в большом количестве факторов, которые

могут оказать влияние на формирование структуры бетона и деградацию его свойств во времени (параллельные процессы), а также в сложном прогнозировании их синергетического эффекта.

Основные этапы контроля в контексте жизненного цикла зданий и сооружений представлены на рис. 1. На разных этапах он включает:

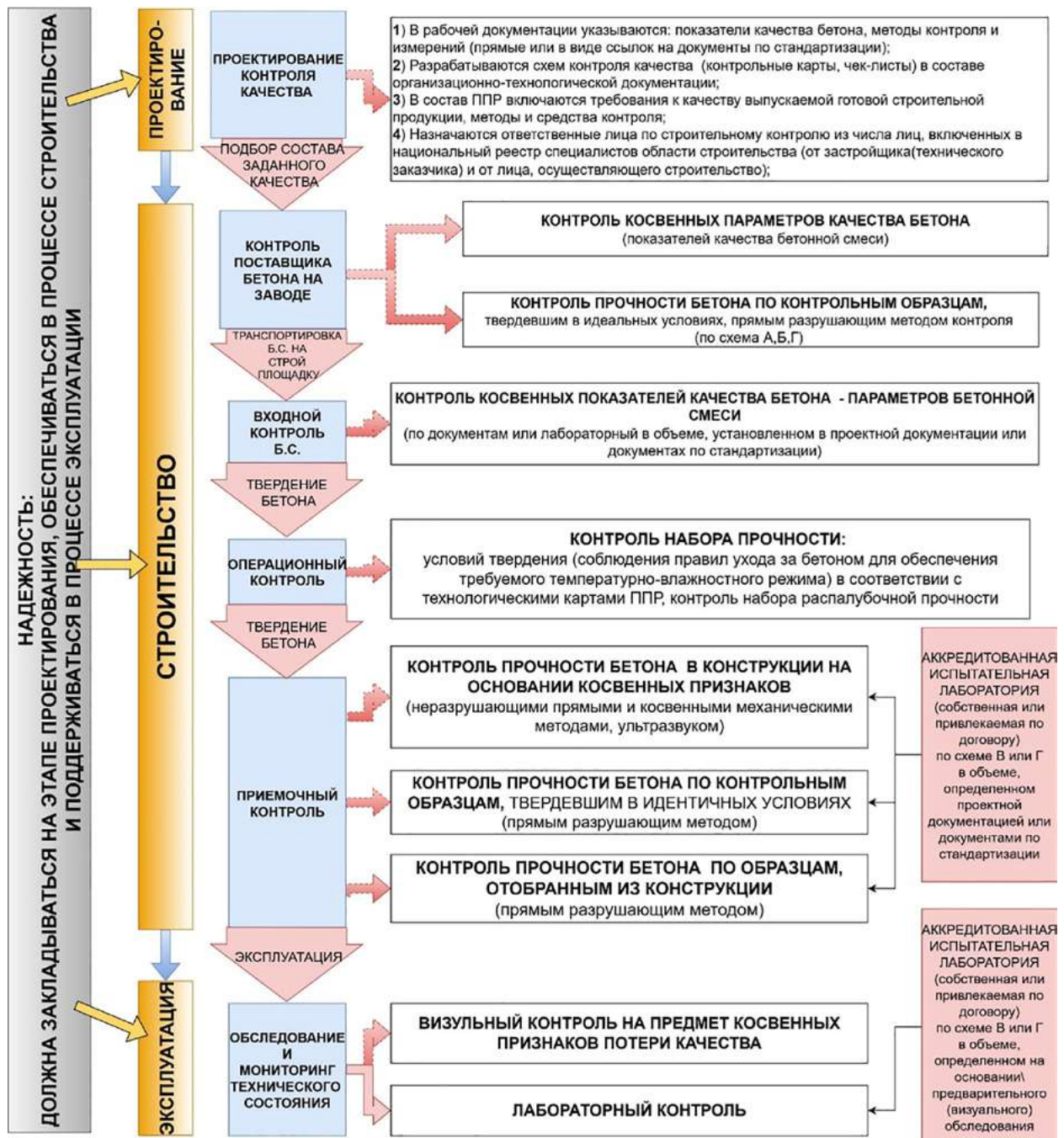


Рис. 1. Схема контроля качества бетона на всех этапах жизненного цикла

- контроль косвенных параметров — показателей качества бетонной смеси (водоцементного отношения, подвижности, плотности и др.);
- контроль прямых показателей (прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и др.) бетона в специально изготовленных образцах;
- контроль прямых показателей качества бетона, отобранного из конструкции, и косвенных показателей прочности бетона в конструкции.

Проблема заключается в том, что на разных этапах множество внешних факторов может оказывать влияние различной степени, в результате чего бетон надлежащего качества, поступивший с завода, может перестать соответствовать требованиям уже в конструкции. При этом множество варьируемых факторов системы контроля организовано не оптимальным образом: отсутствует эффективная комбинация параметров контроля, которая обеспечивала бы достаточную достоверность результатов на каждом этапе. Это не позволяет гарантировать сохранение заданного уровня обеспеченности прочности при переходе от одного этапа к другому.

Для повышения качества выходной информации в процессе контроля требуется анализ факторов, воздействующих на характеристики бетона с момента его выпуска на заводе до потенциального отказа в составе конструкции. Эти факторы следующие:

- **в процессе транспортировки бетонной смеси:** вибрация и тряска могут привести к расслоению бетонной смеси; неподвижность в сочетании с высокой температурой — к раннему началу схватывания и, как следствие, к неравномерному твердению; попадание атмосферных осадков может привести к изменению состава и, соответственно, свойств; кроме того, может иметь место быть задержка доставки;
- **на строительной площадке:** может быть простой смеси до заливки в опалубку и, как следствие, начало схватывания раньше, чем смесь окажется в опалубке; влияние технологии укладки на уплотнение смеси; ранняя распалубка; попытка вернуть

подвижность схватившемуся бетону путем добавления воды; влияние температуры и влажности на твердеющий бетон может нарушить нормальное протекание реакции гидратации при недостаточном соблюдении требований по уходу за бетоном; гравитационное расслоение бетона в конструкции; влияние на твердеющий бетон механических и вибрационных нагрузок;

- **в процессе эксплуатации:** выветривание и перепады температур в сочетании с воздействием влаги приводит к разрушению поверхностных слоев, что упрощает проникновение вглубь бетона агрессивных веществ и образование нежелательных соединений, а также появлению трещин, которые под воздействием эксплуатационных нагрузок постепенно увеличиваются, приводя к разрушению и отказам.

Перечисленные факторы описаны в научнотехнической литературе, однако система контроля развивается недостаточно эффективно и отстает от темпов прогресса в строительном материаловедении (в области бетонов) и в строительной отрасли в целом. Причина заключается в том, что указанные проблемы решаются изолированно на разных уровнях контроля. Развитие осуществляется на каждом уровне «пирамиды контроля» / в каждой цепочке (цепочке создания материала с заданными свойствами, конструкции с требуемыми характеристиками, здания с требуемым уровнем надежности) отдельно от других (рис. 2).

В рамках системы контроля много варьируемых параметров. Например, форма и размер образца для испытания существенно влияют на результат: прочность образцов-кубов выше прочности призматической за счет трения по опорам. При этом основным типом несущих конструкций являются колонны. Именно поэтому в расчетах их прочности не может быть непосредственно использована кубиковая прочность бетона, а основной характеристикой прочности бетона сжатых элементов, используемых при расчете, является призматическая прочность.

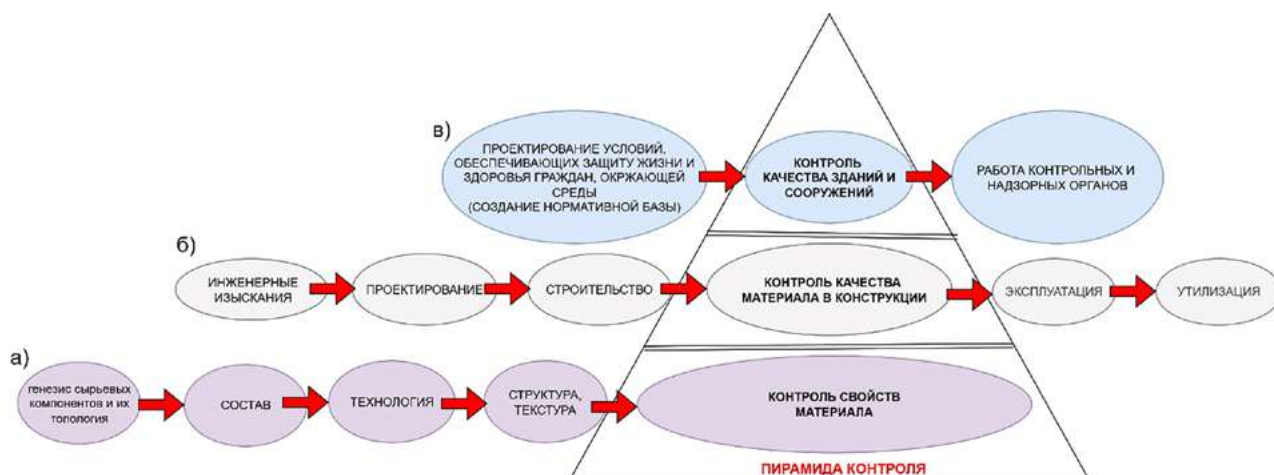


Рис. 2. Пирамида контроля:

а — цепочка создания материала с заданными свойствами; *б* — цепочка создания конструкции с требуемыми характеристиками; *в* — цепочка создания здания с требуемым уровнем надежности

Кубы могут отличаться по размеру, на результат контроля оказывает влияние эффект «столба» (обоймы): образец испытывает трех-осное напряженно-деформированное состояние, в нем отсутствует зона «чистых напряжений» — напряженно-деформированного состояния в том виде, в котором находится бетон в конструкции (в большей степени одноосное), при этом расчет проектировщиками осуществляется при условии одномерного нагружения. Призмы для контроля прочности на сжатие используются редко (они сложнее в изготовлении и испытании: склонны к изгибу, требуется повышенная точность при подготовке и проведении испытания и др.).

То есть складывается следующая ситуация. Проектировщики назначают класс бетона

по прочности исходя из призмной прочно-сти, а контроль осуществляется (чаще всего): **на заводе** — по кубиковой; **на строительной площадке** — по кубиковой, при этом условия твердения образца отличаются и от нормальных, и от реальной конструкции (в том числе на ее основании устанавливают градуировочную зависимость для неразрушающих методов); **в конструкции** (по образцам, отобранным из конструкции) — на цилиндрах с разным соотношением диаметр/высота (кубы допустимы, используются редко).

Это наглядно демонстрирует, как именно теряется достоверность вследствие отсутствия наследственности на разных этапах контроля (рис. 3). Факторы системы контроля, выявлен-

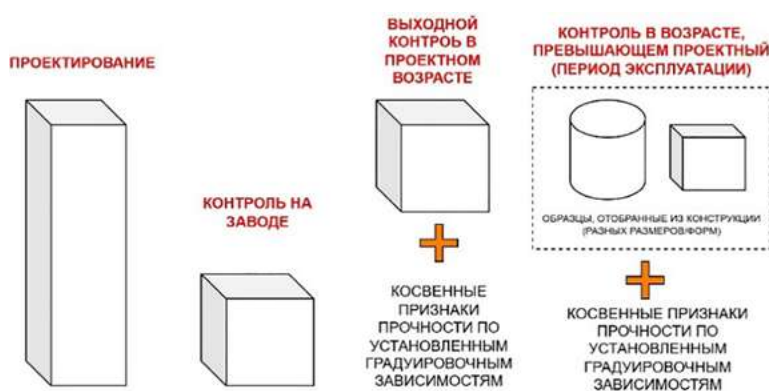


Рис. 3. Образцы, используемые для контроля на разных этапах

ные в ходе проведенного анализа и приводящие к отказам конструкций, представлены на рис. 4.

Исходя из дерева отказов, можно сформулировать три основных направления, в рамках которых возможно снизить влияние различных факторов системы контроля: метрологическая составляющая контроля, статистическая и квалиметрическая.

В спорных ситуациях арбитражным является **разрушающий метод** определения прочности по контрольным образцам или образцам, отобраным из конструкции, при этом по факту они являются косвенными.

При испытании **разрушающим методом по контрольным образцам** погрешность результата контроля прочности при сжатии складывается из:

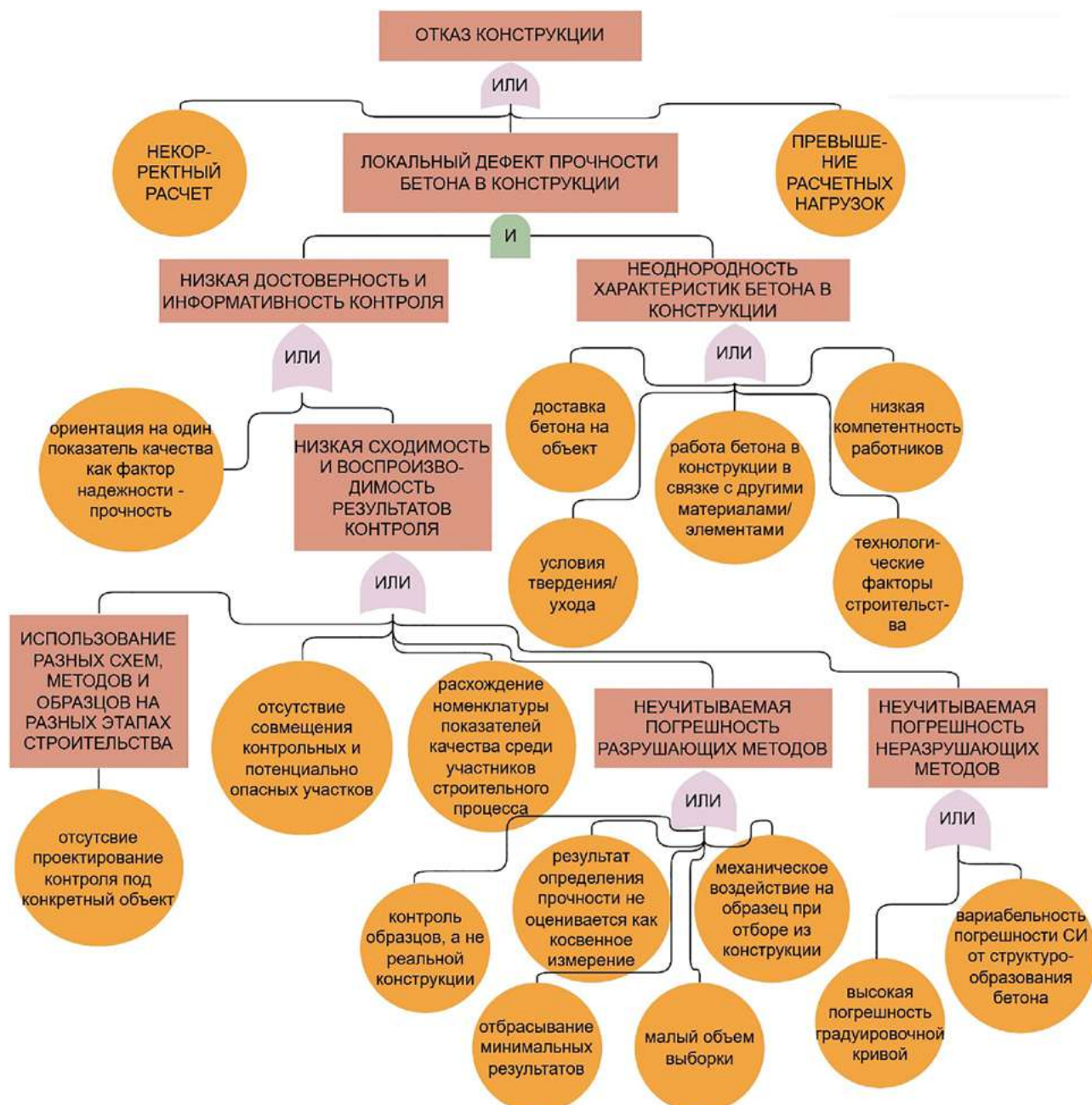


Рис. 4. Дерево отказов для конструкции из бетона (железобетона) в контексте факторов системы контроля

1) инструментальной погрешности измерения (геометрических размеров образца ($\pm 1\%$) и разрушающего усилия ($\pm 2\%$));

2) методологической погрешности, связанной с: различием допустимой формы и размера образца (кубы с ребром: 100, 150, 200, 250, 300 мм; цилиндры диаметром 100; 150; 200; 250; 300 и высотой $h > d$); допустимым отклонением геометрии образца (от плоскостности (0,1 мм на 100 мм длины), прямолинейности (0,1 мм на 100 мм длины или 0,1 % длины), перпендикулярности); возможным выравниванием поверхностей образца (шлифовкой, подмазыванием); отличием условий твердения контрольного образца и бетона в конструкции; объемом выборки; расчетом прочности образца (погрешность косвенного измерения);

3) субъективной погрешности, связанной с формированием образца (уплотнение/вибрирование), подготовкой образца к испытанию, соблюдением условий испытания, выбором режима нагружения.

При испытании **разрушающим методом контроля по образцам, отобранным из конструкции**, погрешность результата контроля прочности при сжатии складывается из:

1) инструментальной погрешности измерения (геометрических размеров образца ($\pm 1\%$) и разрушающего усилия ($\pm 2\%$));

2) методологической погрешности, связанной с:

- различием допустимой формы и размера образца (кубы с ребром: 150 (базовый), 100 (масштабный коэффициент 0,95), 200, 250, 300 мм; цилиндры диаметром 100; 150; 200; 250; 300 и высотой $h > d$ или нестандартные образцы с установлением масштабных коэффициентов), с погрешностью при определении масштабных и переходных коэффициентов, отклонением геометрии (от плоскостности, прямолинейности, перпендикулярности);

- механическим воздействием на образец в момент выбуривания из конструкции и его после-

дующей обработкой, а также связанной с возможным выравниванием поверхностей образца (шлифовкой, подмазыванием), учесть влияние которых на результат испытания затруднительно (действующей системой не предусмотрено);

- методологической погрешностью, связанной с тем, что контрольный участок не может быть любым и проба бетона для испытания выбирается не из самых опасных с точки зрения работы конструкции мест, а с точки зрения удобства и безопасности испытаний;

- расчетом прочности образца (погрешность косвенного измерения);

3) субъективной погрешности, связанной с соблюдением условий проведения испытания, выбором режима нагружения.

Неразрушающий контроль обладает рядом существенных достоинств:

- позволяет повысить полноту контроля и выявлять бракованные конструкции и элементы, которые невозможно определить при выборочном контроле разрушающими методами;

- упрощает установление причин появления брака и их устранение;

- сокращает время испытаний, трудоемкость и затраты на контроль.

Однако неразрушающие методы контроля имеют значительную погрешность, обусловленную следующими факторами:

1. Включают погрешности разрушающего метода, на основе которого строится градуировочная зависимость.

2. Являются косвенными: характеристики определяются по градуировочной шкале, построенной на основании параллельных испытаний разрушающими методами.

3. Согласно экспериментальным данным, могут иметь инструментальную погрешность, существенно превышающую заявленную при:

- отклонении от «классического состава» бетона;

– твердении в условиях, отличных от нормальных [24].

4. Сопровождаются рядом дополнительных погрешностей, которые подробно рассмотрены ниже.

При испытании **неразрушающими механическими методами определения прочности бетона** погрешность результата контроля прочности при сжатии складывается из погрешности метода, используемого для установления градуировочной зависимости, а также:

1) инструментальной погрешности измерения нагрузки приборов для механических испытаний (5 %);

2) методологической погрешности построения градуировочной кривой (вызванной, например, допустимостью использования для установления зависимостей контрольных образцов — образцов-кубов, твердевших в условиях, аналогичных оцениваемой конструкции) и погрешности, обусловленной допустимостью применения стандартной зависимости при использовании прямых неразрушающих методов / допустимостью применения косвенных неразрушающих методов с использованием градуировочных зависимостей, установленных для бетона, отличающегося от испытываемого по составу, возрасту, условиям твердения, влажности;

3) методической погрешности, связанной с:

– выборкой: при испытании методом отрыва со скалыванием участки должны располагаться в зоне наименьших напряжений, вызываемых эксплуатационной нагрузкой или усилием обжатия предварительно напряженной арматуры; при испытании методом скалывания ребра на участке испытания не должно быть трещин, сколов бетона, наплывов или раковин высотой (глубиной) более 5 мм. Участки должны располагаться в зоне наименьших напряжений, вызываемых эксплуатационной нагрузкой или усилием обжатия предварительно напряженной арматуры;

– тем, что контрольные и основные образцы при построении градуировочной зависимости для методов упругого отскока, ударного импульса, пластической деформации, отрыва и скалывания ребра на основании контрольных образцов имеют разные размеры;

– тем, что при определении косвенных характеристик прочности испытания проводят на боковых (по направлению бетонирования) гранях образцов-кубов, а испытание разрушающим методом — в перпендикулярном, при этом у бетона наблюдается анизотропия прочности в направлении укладки и перпендикулярном к нему направлении;

– отбрасыванием результатов измерений на каждом участке, отклонение которых от среднего арифметического значения результатов измерений для данного участка превышает 10 %;

– влиянием погрешности расчета поправочного коэффициента для усилия вырыва анкерного устройства, зависящей от рабочей глубины заделки анкерного устройства и величины проскальзывания анкера;

– тем, что результаты испытаний образцов увеличивают на 5 % для образцов, испытанных методом отрыва;

– оценкой класса бетона по схеме «Г» (с коэффициентом 1,28) при использовании ранее установленных зависимостей (то есть предполагается максимальный коэффициент вариации 13 % и фактически не определяется);

4) субъективной погрешности, связанной с соблюдением условий применения средств измерения и испытательного оборудования для неразрушающего контроля, качеством подготовки поверхности для испытания, обжимкой образца в прессе при испытаниях методом упругого отскока, ударного импульса, пластической деформации.

При определении прочности **ультразвуковым методом** погрешность результата скла-

дывается из погрешности метода, используемого для установления градуировочной зависимости, а также:

1) инструментальной погрешности, связанной с измерением времени прохождения ультразвука через бетон (не более 0,5 %) и измерением базы просвечивания (не более 0,5 %);

2) методической погрешности, связанной с:

- выборкой (влияние поверхности (погрешность обеспечения акустического контакта прибора и поверхности); возможность контроля только участков без арматуры или контроль только поверхностных слоев (поверхностное прозвучивание));

- отбрасыванием отдельного результата измерения скорости ультразвука в каждом образце, отличающегося от среднего арифметического значения результатов измерений более чем на 2 %;

- расчетом скорости ультразвука (погрешность косвенного измерения);

- погрешностью построения градуировочной кривой;

- возможностью оценки класса бетона по схеме «Г» при использовании ранее установленных зависимостей (то есть мы предполагаем максимальный коэффициент вариации 13 % и фактический не определяем) [8];

3) субъективной, связанной с выбором поверхности для прозвучивания, к которой предъявляются ряд требований.

Кроме того, какой именно участок контролировать, определяет заказчик испытания, а лаборатория в случае чего не несет за это ответственность, так как точки контроля заранее не определены. Также весьма размыты требования и к квалификации работников / уровню компетентности испытательных лабораторий, реализующих строительный контроль. И несмотря на то, что методы отличаются по точности и имеют ограничения по применению, нормативно не закреплено, какой из методов в какой ситуации

должен применяться, а от этого сильно варьируется суммарная погрешность оценки прочности бетона, что непосредственно влияет на уровень надежности, так как возрастает вероятность пропуска брака (бетона, прочность которого не соответствует требуемой).

В сочетании с различными схемами контроля все это приводит к конфликту интересов поставщика и потребителя, так как достоверность результатов, полученных на разных участках конструкции разными методами или по разным схемам, значительно отличается.

Также в настоящий момент ни один из методов контроля не позволяет оценить работу бетона в конструкции совместно с арматурой, что также снижает информативность полученных результатов.

Таким образом, проблема системы контроля заключается в том, что допустимо использование разных схем контроля, методов контроля разной точности. В сочетании с тем, что не реализуется проектирование контроля под конкретный объект строительства (контроль в рабочей документации чаще всего закладывается в виде ссылок на стандартные правила и методы, закрепленные в нормативной документации), а также с учетом ограниченности применения методов и проведения испытания на возможных участках, а не наиболее информативных, это приводит к отсутствию наследственности результатов контроля прочности при переходе от одного этапа строительства к другому, что снижает достоверность получаемой выходной информации о прочности бетона при сжатии в конструкции, в связи с чем не всегда возможно своевременно обнаружить синергетический эффект негативного влияния рассмотренных ранее факторов. Невозможность оценить реальный уровень вариативности прочности бетона в конструкции является причиной отказов, а также ведет к излишнему запасу прочности из-за перестраховки.

Выводы

Неоднородность является препятствием для развития высокоэффективных бетонов. Чтобы снизить ее влияние, необходимо устранить слабые места в системе контроля, которые не позволяют получать достоверную информацию о реальном значении прочности бетона в конструкции. Это возможно без глобальных изменений в системе контроля за счет проектирования контроля: система контроля должна проектироваться под конкретный объект и учитывать влияние рассмотренных факторов испытания.

При проектировании необходимо создать условия контроля, которые позволят с требуемой достоверностью определять уровень неоднородности прочности бетона в конструкции (коэффициент вариации). Тем самым будет обеспечена возможность:

- гарантировать уровень неразрушимости материала в конструкции, что, в свою очередь, позволит снизить коэффициент запаса прочности по материалу при сохранении уровня его обеспеченности;

- получать объективную информацию о свойствах материала в конструкции по уровню надежности в любой момент жизненного цикла строительного объекта на основании проектных данных и данных, полученных по результатам испытаний и оценки прочности бетона. Это, в свою очередь, обеспечит эффективное использование потенциала бетона.

Основных направлений совершенствования — три: совершенствование метрологической и квалитетической составляющих, а также интеграция риск-ориентированного подхода при проектировании контроля. По всем направлениям нужно работать системно, а не изолированно. Изменение подхода к контролю качества может исключить необходимость использования искусственных барьеров и обеспечить эффективное использование потенциала бетона в конструкции.

Список источников

1. Статистика по авариям/обрушениям / Нострой. — URL: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (дата обращения: 25.07.2025).
2. Беленцов Ю. А. Возможность пропустить бракованные изделия из бетона с учетом точности контроля / Ю. А. Беленцов, Ш. М. Мамедов, Н. С. Воронцова, П. Н. Пачулия // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 5.
3. Беленцов Ю. А. Метрологическое обеспечение контроля качества бетонов для обеспечения расчетного уровня надежности строительной продукции / Ю. А. Беленцов, М. С. Абу-Хасан, В. В. Егоров, Л. Р. Куправа // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2021. — № 4(1040). — С. 34–36.
4. Беленцов Ю. А. Влияние точности контроля прочности на качество возводимых конструкций / Ю. А. Беленцов, М. С. Абу-Хасан // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2021. — № 10. — С. 20–23.
5. ГОСТ 18105—2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
6. ГОСТ 31914—2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества.
7. ГОСТ 31937—2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
8. ГОСТ 27751—2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
9. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. — М.: Стройиздат, 1978. — 239 с.
10. Лантух-Лященко А. И. Концепция надежности в Еврокоде / А. И. Лантух-Лященко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. — 2014. — № 6. — С. 79–88.
11. СП 20.13330.2016 (СНиП 2.01.07—85). Нагрузки и воздействия.
12. Казанская Л. Ф. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов / Л. Ф. Казанская, В. А. Майер, Э. С. Сибгатуллин // Известия Петербургского универси-

тета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — № 4. — С. 931–943.

13. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ / Российская Федерация. — М., 2004.

14. ГОСТ 4.212—80. Система показателей качества продукции. Строительство. Бетоны. Номенклатура показателей.

15. ГОСТ 10180—2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

16. ГОСТ 28570—2019. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций.

17. ГОСТ 22690—2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.

18. ГОСТ 17624—2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.

19. СП 48.13330.2019. Организация строительства.

20. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

21. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции.

22. Постановление Правительства РФ от 21.06.2010 № 468 «О порядке проведения строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства». — М., 2010.

23. Байков В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс: учебник для вузов / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. — М.: Стройиздат, 1991. — 5-е изд., перераб. и доп. — 67 с.

24. Черепанова Д. А. Учет влияния условий твердения бетона как фактор обеспечения требуемой надежности / Д. А. Черепанова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — № 4. — С. 909–921.

Дата поступления: 05.09.2025

Решение о публикации: 15.10.2025

Контактная информация:

ЧЕРЕПАНОВА Дария Алексеевна —

ст. преподаватель, начальник отдела качества;

cherepanova@pgups.ru

The Heredity of Concrete Quality Indicators As an Effective Control Factor

D. A. Cherepanova

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

For citation: Cherepanova D. A. The Heredity of Concrete Quality Indicators As an Effective Control Factor // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1060–1072. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1060-1072

Summary

Purpose: To identify the factors within the concrete quality control system that affect the assurance of concrete compressive strength throughout the entire life cycle of buildings and structures, from design to disposal. Additionally, the research seeks to develop recommendations that ensure the desired level of concrete compressive strength. **Methods:** A comparative analysis of existing data, standards and scientific literature has demonstrated the effectiveness of fault tree analysis in exploring the relationships between control system factors and the failure of concrete and reinforced concrete structures. The assessment of the control system's status, viewed as a barrier to development, is based on the findings from the author's empirical and theoretical

research. **Results:** The study outlines the key stages and levels of a concrete quality control system within the framework of the complete life cycle of buildings and structures. The connections between concrete failure in structures and the allowable discrepancies in methods and techniques for assessing concrete compressive strength have been established. A “fault tree” analysis for concrete (and reinforced concrete) structures has been created within the framework of the quality control system factors. The impact of various factors within the quality control system on ensuring an effective integration of quality control parameters and the reliability of the results obtained to achieve a predetermined level of strength assurance has been identified. The components contributing to the overall error in standard strength testing methods, both destructive and non-destructive, have been identified, including instrumental, methodological, and subjective ones. **Practical significance:** The practical significance of this work lies in the justification for implementing a tailored control design stage to an individual project, which will mitigate the effects of material heterogeneity without necessitating extensive modifications to the control system.

Keywords: Quality control, compressive strength, error, fault tree analysis, reliability, strength control methods, shape and size of samples.

References

1. *Statistika po avariyam/obrusheniyam. Nostroy* [Accident/Collapse Statistics. Nostroy]. Available at: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (accessed: July 25, 2025). (In Russian)
2. Belentsov Yu. A., Mamedov Sh. M., Vorontsova N. S., Pachuliya P. N. Vozmozhnost' propustit' brakovannyye izdeliya iz betona s uchetom tochnosti kontrolya [Possibility of Skipping Defective Concrete Products Taking into Account Inspection Accuracy]. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2023, vol. 15, Iss. 5. (In Russian)
3. Belentsov Yu. A., Abu-Khasan M. S., Egorov V. V., Kuprava L. R. Metrologicheskoe obespechenie kontrolya kachestva betonov dlya obespecheniya raschetnogo urovnya nadezhnosti stroitel'noy produktsii [Metrological Support for Concrete Quality Control to Ensure the Estimated Reliability Level of Construction Products]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Bulletin of Construction Equipment]. 2021, Iss. 4(1040), pp. 34–36. (In Russian)
4. Belentsov Yu. A., Abu-Khasan M. S. Vliyaniye tochnosti kontrolya prochnosti na kachestvo vozvodimyykh konstruktsey [Influence of Strength Control Accuracy on the Quality of Erected Structures]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Bulletin of Construction Equipment]. 2021, Iss. 10, pp. 20–23. (In Russian)
5. *GOST 18105—2018. Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti* [Concretes. Rules for Strength Control and Assessment]. (In Russian)
6. *GOST 31914—2012. Betony vysokoprochnyye tyazhe-lye i melkozernistyye dlya monolitnykh konstruktsey. Pravila kontrolya i otsenki kachestva* [High-Strength Heavy and Fine-Grained Concretes for Monolithic Structures. Rules for Quality Control and Assessment]. (In Russian)
7. *GOST 31937—2024. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya* [Buildings and Structures. Rules for Inspection and Monitoring of Technical Condition]. (In Russian)
8. *GOST 27751—2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsey i osnovaniy. Osnovnyye polozheniya* [Reliability of Building Structures and Foundations. Basic Provisions]. (In Russian)
9. Rzhantsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsey na nadezhnost'* [Theory of Reliability Analysis of Building Structures]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1978, 239 p. (In Russian)
10. Lantukh-Lyashchenko A. I. Kontseptsiya nadezhnosti v Evrokode [Reliability Concept in Eurocode]. *Mosti ta tuneli: teoriya, doslidszhennyya, praktika* [Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice]. 2014, Iss. 6, pp. 79–88. (In Russian)
11. *SP 20.13330.2016 (SNiP 2.01.07—85). Nagruzki i vozdeystviya* [Loads and Impacts]. (In Russian)
12. Kazanskaya L. F., Mayer V. A., Sibgatullin E. S. Vzaimosvyaz' faktorov, opredelyayushchikh dolgov-echnost' betonov [Interrelationship between Factors Determining the Durability of Concrete]. *Izvestiya*

Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 931–943. (In Russian)

13. *Gradostroitel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii: Federal'nyy zakon ot 29.12.2004 № 190-FZ. Rossiyskaya Federatsiya* [Urban Development Code of the Russian Federation: Federal Law № 190-FZ of 29.12.2004. Russian Federation]. Moscow, 2004. (In Russian)

14. *GOST 4.212—80. Sistema pokazateley kachestva produktsii. Stroitel'stvo. Betony. Nomenklatura pokazateley* [GOST 4.212—80. System of Product Quality Indicators. Construction. Concrete. Nomenclature of Indicators]. (In Russian)

15. *GOST 10180—2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nyim obraztsam* [Concrete. Methods for Determining Strength Using Control Samples]. (In Russian)

16. *GOST 28570—2019. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po obraztsam, otobrannym iz konstruktsiy* [Concrete. Methods for Determining Strength Using Samples Taken from Structures]. (In Russian)

17. *GOST 22690—2015. Betony. Opredelenie prochnosti mekhanicheskimi metodami nerazrushayushchego kontrolya* [Concrete. Determining Strength Using Mechanical Nondestructive Testing Methods]. (In Russian)

18. *GOST 17624—2021. Betony. Ul'trazvukovoy metod opredeleniya prochnosti* [Concrete. Ultrasonic Method for Determining Strength]. (In Russian)

19. *SP 48.13330.2019. Organizatsiya stroitel'stva* [Organization of Construction]. (In Russian)

20. *SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovnye polozeniya* [Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions]. (In Russian)

21. *SP 70.13330.2012. Nesushchie i ograddayushchie konstruktsii* [Load-Bearing and Enclosing Structures]. (In Russian)

22. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 21.06.2010 № 468 “O poryadke provedeniya stroitel'nogo kontrolya pri osushchestvlenii stroitel'stva, rekonstruktsii i kapital'nogo remonta ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva”* [RF Government Resolution No. 468 of June 21, 2010 “On the Procedure for Conducting Construction Supervision During the Construction, Reconstruction, and Major Repairs of Capital Construction Projects”]. Moscow, 2010. (In Russian)

23. Baykov V. N., Sigalov E. E. *Zhelezobetonnye konstruktsii. Obshchiy kurs: uchebnik dlya vuzov* [Reinforced Concrete Structures. General Course: Textbook for Universities]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1991, 67 p. (In Russian)

24. Cherepanova D. A. *Uchet vliyaniya usloviy tverdeniya betona kak faktor obespecheniya trebuemoy nadezhnosti* [Accounting for the Influence of Concrete Hardening Conditions as a Factor in Ensuring the Required Reliability]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 909–921. (In Russian)

Received: September 05, 2025

Accepted: October 15, 2025

Author's information:

Dariya A. CHEREPANOVA — Senior Lecturer,
Head of Quality Department; cherepanova@pgups.ru

УДК 624.21.055:693.5

Обоснование возможности и перспектив применения технологии электрохимической защиты от коррозии арматуры, расположенной в теле опор мостовых сооружений

А. А. Антонюк¹, А. А. Белый^{2,3}, Ш. Ш. Кадирова², А. А. Махонько⁴

¹ООО «СИНЕРЭФ-центр», Российская Федерация, 194044, Санкт-Петербург, ул. Смоляčkова, 12, к. 2, лит. А, оф. 403

²Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, Ташкент, Мирабадский район, улица Темирийолчилар, 1

³ООО «К2 Инжиниринг», Российская Федерация, 123290, Москва, Шелепихинское шоссе, 11, к. 1

⁴ООО «Оператор скоростных автомагистралей — Север», Россия, г. Санкт-Петербург, 191186, пер. Волынский, д. 3А, лит. А

Для цитирования: Антонюк А. А., Белый А. А., Кадирова Ш. Ш., Махонько А. А. Обоснование возможности и перспектив применения технологии электрохимической защиты от коррозии арматуры, расположенной в теле опор мостовых сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1073–1084. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1073-1084

Аннотация

Цель: Проанализировать технические аспекты, оценить эффективность и экономическую целесообразность применения электрохимической защиты (ЭХЗ) от коррозии для продления срока службы и повышения надежности железобетонных опор мостовых сооружений в условиях хлоридной агрессии. **Метод:** Анализ научных источников (базы Scopus, Web of Science и РИНЦ), нормативно-технической документации (стандарты ISO, отечественные своды правил) и результатов натурных обследований. Применяются математическое моделирование для оценки зависимости скорости коррозии от концентрации хлоридов и плотности защитного тока и метод анализа жизненного цикла (LCCA) для сравнения стратегий содержания объектов с использованием специализированного ПО. Проведены натурные замеры содержания хлор-ионов и характеристик блуждающих токов. **Результаты:** Результаты исследования демонстрируют экспоненциальный рост скорости коррозии при концентрации хлоридов свыше 0,4 % (с 2,43 до 177,01 мкм/год) и возможность подавления коррозии на 99 % при плотности тока 10–15 мА/м². Системы ЭХЗ с внешним источником тока продлевают срок службы опор в 45 раз при начальных инвестициях около 450 у. е./м², снижая NPV затрат до –355 тыс. у. е. (против –510 тыс. у. е. при традиционных ремонтах). Выявлены оптимальные диапазоны плотности катодного тока (5–15 мА/м²) для эффективного подавления коррозии. **Практическая значимость:** Возможность использования ЭХЗ как элемента стратегии управления жизненным циклом инфраструктуры. Технология обеспечивает экономию средств (в 1,5–2,5 раза по сравнению с традиционными подходами), повышает безопасность эксплуатации мостов и способствует рациональному расходованию средств на содержание транспортной сети.

Ключевые слова: Электрохимическая защита, коррозия арматуры, железобетонные опоры, хлоридная агрессия, катодная поляризация.

Введение

Железобетонные опоры мостов — ключевые элементы транспортной инфраструктуры, обеспечивающие ее надежность и безопасность. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию агрессивных факторов: перепадов температуры и влажности, карбонизации бетона, а главное — хлоридной агрессии от реагентов и солевых туманов [1–11].

Проникая в бетон, хлориды разрушают защитную оксидную пленку арматуры, вызывая электрохимическую коррозию (рис. 1). Образующиеся продукты коррозии, значительно превышающие объем металла, создают внутреннее давление. Это приводит к растрескиванию бетона, оголению арматуры и снижению несущей способности конструкции.

Традиционные методы ремонта (удаление и замена поврежденного бетона) малоэффективны, так как не устраняют причину проблемы — хлориды и электрохимические реакции в конструкции.

Поэтому необходимы технологии, способные подавлять коррозионный процесс. Одной из перспективных методик является электрохимическая защита (ЭХЗ), в частности катодная поляризация арматуры. Метод основан на смещении электро-

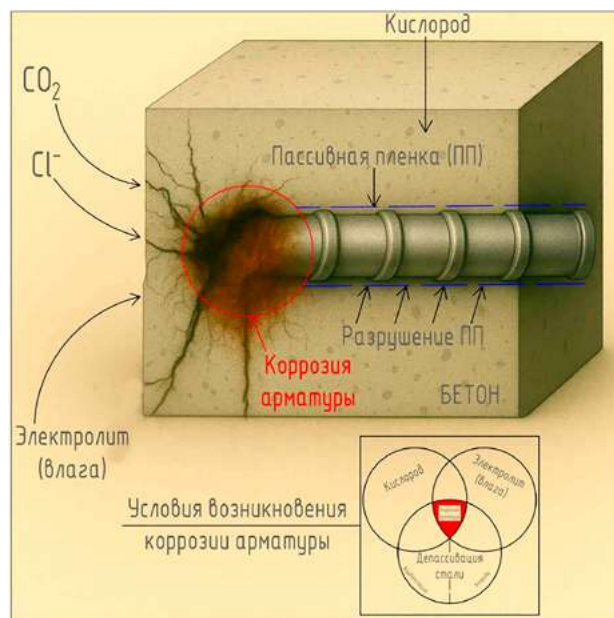


Рис. 1. Условия возникновения коррозии арматуры (автор: А. А. Антонюк)

химического потенциала арматуры в отрицательную сторону, что снижает скорость ее растворения (рис. 2). Это достигается созданием внешнего электрического поля, где арматура становится катодом, а установленный анод — анодом [12–17].

Анализ нормативно-технической документации (EN 1504-2, EN 1504-7, ГОСТ 31384—2017, СП 28.13330.2017, ОДМ 218.4.002—2009) пока-

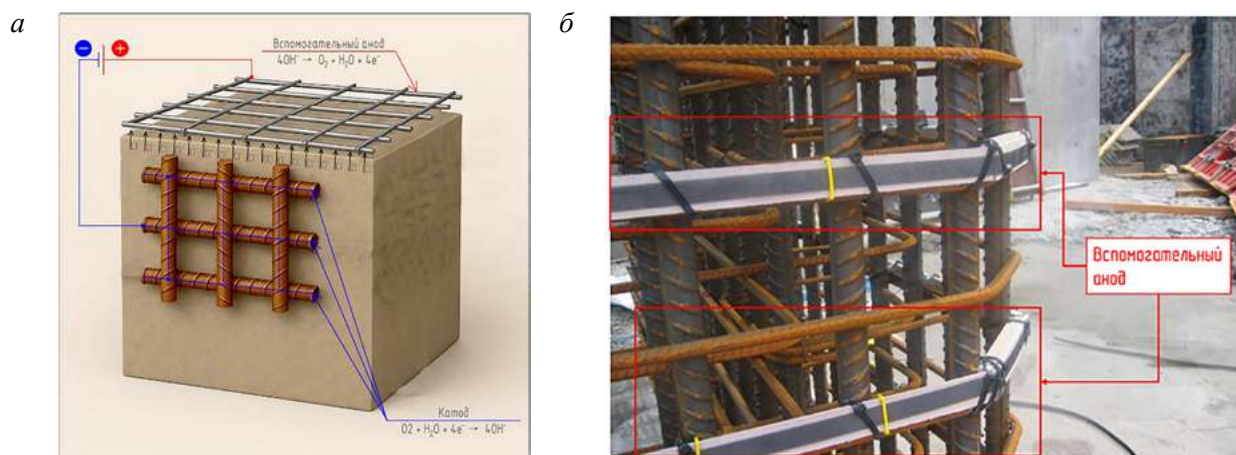


Рис. 2. Катодная защита арматуры от коррозии (автор: А. А. Антонюк):
а — схема работы катодной защиты; б — пример устройства катодной защиты

зывает успешное применение электрохимической защиты (ЭХЗ) для трубопроводов, морских сооружений и резервуаров. Однако для железобетонных опор мостов прямые указания по использованию ЭХЗ отсутствуют, что замедляет внедрение метода в транспортной отрасли.

Статья посвящена обоснованию применения ЭХЗ для защиты мостовых опор от хлоридной агрессии. Цель работы — анализ технических и экономических аспектов внедрения систем ЭХЗ как элемента стратегии управления транспортной инфраструктурой.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на комплексном подходе, включающем анализ научных данных, нормативно-технической документации и результатов обследований. Информационная база включает публикации из Scopus, Web of Science и РИНЦ (2005–2025 гг.) по темам электрохимической защиты бетона, коррозии железобетона и катодной поляризации арматуры.

Проанализированы международные стандарты (ISO 12696:2016) и отечественные нормы по защите конструкций от коррозии. Изучен опыт применения ЭХЗ в транспортной инфраструктуре Северной Америки и Европы. Для оценки процессов использован метод математического моде-

лирования, позволяющий прогнозировать эффективность защитных мероприятий.

Аналитическая часть включает создание и проверку моделей, описывающих связь между концентрацией хлоридов в бетоне, скоростью коррозии, параметрами ЭХЗ и увеличением ресурса конструкции.

Для оценки экономической эффективности применен метод анализа жизненного цикла (LCCA), позволяющий сравнить стратегии содержания объекта: отсутствие защиты, традиционные ремонты и ЭХЗ через показатель чистой стоимости (NPV).

Исходные данные для расчетов включали актуальные цены на материалы, оборудование ЭХЗ и работы (третий квартал 2025 г.). Математическая обработка с помощью специализированного ПО дала количественную оценку техническим и экономическим перспективам технологии [18–30].

В разных климатических зонах влага серьезно влияет на бетонные конструкции. Даже при качественном цементе и правильном составе бетона длительный контакт с водой ускоряет образование трещин и проникновение агрессивных сред внутрь материала. Это приводит к накоплению хлоридов в бетоне, которые при наличии тока ускоряют разрушение арматуры [31].



Рис. 3. Объект исследования (автор: А. А. Антонюк)

Для проверки гипотезы о возможном агрессивном электрохимическом воздействии на бетонные элементы инфраструктуры были проведены натурные замеры содержания хлор-ионов и характеристик блуждающих токов на опорах № 12, 10 и 8-3 путепровода на улице Бабура в направлении Ташкентского международного аэропорта имени Ислама Каримова. Объект находится в сложных природно-климатических, техногенных и антропогенных условиях [32].

Концентрацию хлоридов определяли лабораторным анализом проб бетона. Характеристики блуждающих токов измеряли полевым методом с помощью набора «Блуждающие токи» (ООО «КВАЗАР», Уфа) и стальных электродов, входящих в комплектацию набора.

Замеры в контрольных точках (по 4 сечения на опору, всего более 100 измерений) показали наличие блуждающего тока с напряжением 0,008–0,35 В. Лабораторные исследования зафиксировали концентрацию хлоридов в бетоне на уровне 0,04 %.

По ГОСТ 5382—2019 и СП 28.13330.2012 такое сочетание допустимой концентрации хлоридов с высокими значениями блуждающих токов создает агрессивную среду, провоцирующую электрохимическую коррозию железобетона.

Сочетание влаги и других агрессивных факторов значительно сокращает срок службы бетона, вызывает коррозию арматуры и деформацию конструкций. При избыточном увлажнении возрастает риск растрескивания швов и выхода из строя несущих систем, особенно в регионах с перепадами температур. Промедление с ремонтом приводит к более сложным и дорогостоящим работам. Исследование механизмов проникновения влаги и методов защиты актуально для повышения надежности строительных объектов и предотвращения аварий.

Традиционные методы защиты от влаги (оклеочная, обмазочная гидроизоляция, восстановление защитного слоя) ограничены по времени и стоимости. Ремонт длится от нескольких дней



Рис. 4. Натурный поиск и измерения характеристик блуждающего тока (автор: А. А. Белый):
а, б — набор «Блуждающие токи»; в, г — процесс натурных измерений

до недель, а цена зависит от технологии и площади повреждений. Комбинированные решения повышают эффективность, но увеличивают затраты. При реконструкции сложных сооружений стоимость растет из-за труднодоступности отдельных конструктивных слоев. Планирование бюджета необходимо на всех этапах жизненного цикла объекта. Исследование процессов разрушения бетона и совершенствование методов контроля влаги помогают снизить расходы.

Результаты и обсуждение

Ключевая проблема деградации железобетонных опор — нелинейное развитие хлоридной коррозии. До достижения критической концентрации хлоридов коррозия идет медленно, но после депассивации скорость разрушения резко возрастает. Традиционные методы восстановления защитного слоя лишь временно изолируют арматуру, не останавливая электрохимические реакции в бетоне с высоким содержанием хлоридов.

Для оценки потенциала ЭХЗ нужно сравнить скорость коррозии незащищенной конструкции с показателями при работе системы. Первый шаг — установить зависимость скорости коррозии от концентрации хлорид-ионов. На основе исследований создана модель для наиболее распространенного бетона, используемого при строительстве опор мостов (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость скорости коррозии арматуры от концентрации хлорид-ионов в поровой жидкости бетона

Концентрация хлорид-ионов, % от массы цемента	Плотность тока коррозии, мкА/см ²	Скорость коррозии, мкм/год
0,20	0,08	0,92
0,40	0,21	2,43
0,80	1,15	13,28
1,20	3,44	39,76
1,60	7,89	91,21
2,00	15,31	177,01

Анализ табл. 1 демонстрирует взрывной рост коррозии при концентрации хлоридов 0,4–0,6 % от массы цемента. При удвоении концентрации с 0,4 % до 0,8 % скорость коррозии возрастает в 5,4 раза (с 2,43 до 13,28 мкм/год), а при 1,6 % — в 37,5 раза. Задержка с защитой приводит к серьезным повреждениям.

При скорости коррозии 0,091 мм/год арматурный стержень диаметром 16 мм теряет 10 % своего сечения (как следствие падает несущая способность) за 9–10 лет. Это подтверждает необходимость применения технологий для снижения скорости коррозии в зараженных хлоридами конструкциях.

Данные табл. 2 показывают прямую зависимость электрохимического эффекта от плотности защитного тока. При 2,55 мА/м² достигается смещение потенциала на 92,3 мВ, что снижает коррозию на 85,7 %. Удвоение плотности тока до 5,10 мА/м² дает смещение 151,8 мВ и снижает коррозию до 6 % от исходной. Наблюдается эффект насыщения: при увеличении тока с 15,30 до 20,40 мА/м² прирост защиты минимален (0,2 %).

Это наблюдение имеет важное практическое значение: оно указывает на существование оптимального диапазона плотности тока — 5–15 мА/м², обеспечивающего подавление коррозии более чем на 99 % при умеренных энергозатратах. Увели-

Таблица 2. Эффективность смещения потенциала арматуры в зависимости от плотности катодного тока

Плотность защитного катодного тока, мА/м ²	Смещение потенциала (относительно исходного), мВ	Степень подавления коррозии, %
2,55	–92,3	85,7
5,10	–151,8	94,2
7,65	–189,4	97,8
10,20	–218,6	99,1
15,30	–255,1	99,7
20,40	–280,9	99,9

чение тока нецелесообразно из-за экономических факторов и риска побочных эффектов, таких как наводороживание арматуры или щелочная деградация бетона. Система ЭХЗ должна поддерживать контролируемую подачу тока в этом диапазоне.

Данные табл. 3 показывают, что системы ЭХЗ с внешним источником тока и распределенным анодом (например, титановой сеткой) обеспечивают максимальное продление срока службы в 45,15 раза. Эффективность достигается за счет гибкого регулирования и равномерного распределения тока. При высоких начальных затратах (450,25 у. е./м²) система имеет минимальную стоимость одного года продления срока службы — 2,26 у. е./м².

Гальванические системы проще в монтаже и не требуют внешнего питания, но имеют низкую нерегулируемую плотность тока. Система с дискретными анодами продлевает срок службы в 7 раз, что меньше, чем у систем с внешним источником. При этом стоимость года продления срока службы сооружения у гальванических систем почти вдвое выше. Для мостовых опор стратегически оправдан выбор систем с внешним источником тока, несмотря на их сложность.

Экономический анализ по данным из табл. 4 подтверждает эффективность превентивного подхода. «Нулевой вариант» с ремонтом только при авариях — самый затратный в долгосрочной перспективе (–758,21 тыс. у. е.) из-за дорогостоящего

Таблица 3. Прогнозируемое увеличение срока службы опоры при использовании различных систем ЭХЗ (для начальной скорости коррозии 40 мкм/год)

Тип системы ЭХЗ	Средняя плотность тока, мА/м ²	Начальные инвестиции, у. е./м ²	Коэффициент продления срока службы	Стоимость года продленной жизни, у. е./м ²
Гальванические аноды (дискретные)	2,75	185,50	6,97	4,45
Гальванические аноды (сплошное покрытие)	4,21	290,70	12,33	4,11
Система с внешним источником тока (титановая сетка)	10,50	450,25	45,15	2,26
Система с внешним источником тока (токопроводящее покрытие)	8,15	380,90	28,62	2,39

восстановления на поздних стадиях разрушения. Стратегия плановых ремонтов лучше, но все равно требует значительных затрат (–510,66 тыс. у. е.) из-за периодической замены бетона.

Стратегия с гальванической ЭХЗ наиболее экономична (NPV –288,43 тыс. у. е.). Система с внешним источником тока имеет больший NPV (–355,19 тыс. у. е.) из-за высоких первоначальных затрат, но обладает лучшей технической эффективностью. Выбор между системами зависит от специфики объекта и условий эксплуатации. Обе

Таблица 4. Сравнительный экономический анализ стратегий содержания железобетонной опоры на горизонте 50 лет (приведенная чистая стоимость затрат, NPV, тыс. у. е.)

Стратегия содержания	Начальные инвестиции	Затраты на ремонты	Затраты на мониторинг и ЭХЗ	NPV затрат (ставка дисконтирования 5 %)
«Нулевой вариант» (только аварийный ремонт)	0	1850,75	0	–758,21
Традиционные ремонты (каждые 10–12 лет)	0	980,50	50,15	–510,66
Установка системы ЭХЗ (гальванической)	95,30	150,20	115,80	–288,43
Установка системы ЭХЗ (внешний источник)	220,10	55,60	180,45	–355,19

стратегии ЭХЗ на 50-летнем горизонте планирования в 1,5–2,5 раза выгоднее традиционных методов.

Анализ данных показывает эффективность электрохимической защиты (ЭХЗ) для борьбы с коррозией. Экспоненциальный рост коррозии при увеличении хлоридов (см. табл. 1) требует активных методов противодействия. ЭХЗ снижает скорость коррозии на 99 % через смещение потенциала арматуры (см. табл. 2).

Техническая эффективность (см. табл. 3) связана с возможностью систем поддерживать оптимальную плотность тока 8–11 мА/м². Это увеличивает ресурс конструкции в десятки раз, переводя ее в состояние стабилизации.

Экономическое обоснование (см. табл. 4) подтверждает окупаемость высоких начальных инвестиций за счет сокращения затрат на ремонты. Показатель NPV демонстрирует выгоду вложений в ЭХЗ в течение жизненного цикла объекта.

В заключение отметим: ЭХЗ — системное решение, технически обоснованное и экономически целесообразное. Технология позволяет выйти из цикла «разрушение — ремонт», обеспечивая надежную защиту конструкций даже в агрессивных условиях. Это ключевой фактор развития транспортной инфраструктуры и рационального использования ресурсов.

Выводы

Технология электрохимической защиты (ЭХЗ) — эффективный метод борьбы с коррозией арматуры в мостовых опорах. В отличие от традиционных методов, катодная поляризация воздействует на причину разрушения, снижая скорость коррозии на 99 %. Системы ЭХЗ с внешним источником тока увеличивают срок службы конструкций в 40–50 раз.

ЭХЗ следует рассматривать как ключевой элемент стратегии управления инфраструктурой, а не просто метод ремонта. Экономический

анализ показывает, что, несмотря на высокие первоначальные затраты, применение ЭХЗ наиболее выгодно на 50-летнем горизонте. Экономия достигается за счет исключения дорогостоящих капитальных ремонтов.

Внедрение ЭХЗ повышает безопасность мостов, сокращает потери от перекрытия движения и оптимизирует расходы на содержание транспортной сети. Широкое применение ЭХЗ — технически и экономически обоснованный шаг к созданию устойчивой инфраструктуры.

Список источников

1. Сурнин Д. А. Использование цинка для антикоррозионной защиты мостов / Д. А. Сурнин // Техническое регулирование в транспортном строительстве. — 2022. — № 2 (53). — С. 60–66.
2. Матюнин Д. Ю. Применение протекторных сплавов для защиты от коррозии морских объектов / Д. Ю. Матюнин, С. А. Казьмин, А. Б. Босов, А. В. Лобанов // Гидротехника. — 2024. — № 1(74). — С. 2–9.
3. Бурков А. К. Комплексные решения электрохимической защиты от коррозии — оборудование и аспекты проектирования / А. К. Бурков, И. И. Попов // Гидротехника. — 2025. — № 2. — С. 69–71.
4. Şirinova A. Y. Metal konstruksiyaların korroziyadan mühafizəsində elektrokimyəvi katod mühafizə qurğuları / A. Y. Şirinova // Elmi xəbərlər. Təbiət və Texniki Elmlər Bölməsi. — 2024. — Vol. 24. — Iss. 3. — Pp. 89–94.
5. Каверинский В. С. Новые методы защиты от коррозии / В. С. Каверинский, Д. В. Каверинский // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2020. — № 5. — С. 10–14.
6. Ануфриев Н. Г. Исследование коррозионного поведения алюминия 1980Т1 в морской воде и буровом растворе электрохимическими методами / Н. Г. Ануфриев, Ю. А. Кузенков // Практика противокоррозионной защиты. — 2022. — Т. 27. — № 3. — С. 7–30.
7. Заварзин С. В. Высокотемпературная солевая коррозия и защита материалов газотурбинных двигателей (обзор) / С. В. Заварзин, М. С. Оглодков, Д. В. Чесноков,

И. А. Козлов // Труды ВИАМ. — 2022. — № 3(109). — С. 121–134.

8. Гарашко В. В. Антикоррозионная защита шпунтовых ограждений: технологии, материалы и перспективы / В. В. Гарашко // Молодой исследователь Дона. — 2025. — Т. 10. — № 3(54). — С. 17–21.

9. Бузинер Ю. Л. Антикоррозионное покрытие Ecomast для защиты ГТС в различных условиях эксплуатации / Ю. Л. Бузинер, Н. Н. Шамаков // Гидротехника. — 2024. — № 4(77). — С. 74–75.

10. Михеева О. В. Принципы антикоррозионной защиты трубопроводов / О. В. Михеева, Е. Н. Миркина, В. С. Мавзовин // Экономика строительства. — 2025. — № 1. — С. 356–359.

11. Рева Ю. В. Электрохимическая протекторная защита активных частей электрических машин открытого исполнения для судов ледового класса / Ю. В. Рева // Проблемы управления рисками в техносфере. — 2022. — № 4(64). — С. 104–110.

12. Захарова П. И. Новый перспективный коррозионно-стойкий материал с повышенным ресурсом работы для предупреждения ситуаций техногенного характера / П. И. Захарова, А. В. Хорин // Молодежь и наука. — 2023. — № 9.

13. Пичугова Л. Н. Защита от коррозии на АЭС / Л. Н. Пичугова // Энергетические установки и технологии. — 2023. — Т. 9. — № 4. — С. 74–83.

14. Бочаров В. А. Цинкирование — высокоэффективная защита от коррозии / В. А. Бочаров // Гидротехника. — 2024. — № 1(74). — С. 62–64.

15. Ревин П. О. Исследование долговечности антикоррозионных покрытий для защиты причальных сооружений / П. О. Ревин, А. В. Макаренко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2022. — Т. 12. — № 5. — С. 470–479.

16. Овчинникова Т. А. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций / Т. А. Овчинникова, А. Н. Маринин, И. Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 5(24). — № 06KO514.

17. Мигунов В. Н. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии: монография / В. Н. Мигунов, И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников. — Пенза: ПГУАС, 2014. — 294 с.

18. Степанова В. Ф. Катодная электрохимическая защита арматуры от коррозии в железобетонных конструкциях / В. Ф. Степанова, Н. К. Розенталь, Н. А. Моисеева // Промышленное и гражданское строительство. — 2023. — № 12. — С. 46–50.

19. Dang V. Q. Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious materials under an accelerated carbonation condition / V. Q. Dang, Y. Ogawa, P. T. Bui, K. Kawai // Construct. Build. Mater. — 2021. — Vol. 274. — P. 122016. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122016.

20. Шалый Е. Е. Долговечность морских сооружений при комбинированной коррозии железобетона / Е. Е. Шалый, С. Н. Леонович, Л. В. Ким // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. — 2018. — № 1(5). — С. 65–72.

21. Леонович С. Н. Долговечность бетона при хлоридной агрессии: монография / С. Н. Леонович, А. В. Степанова, В. Г. Цуприк, Л. В. Ким и др.; Инженерная школа ДВФУ. — Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. — 90 с.

22. Карпенко Н. И. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций / Н. И. Карпенко, В. Н. Ярмаковский, В. Т. Ерофеев // Academia. Архитектура и строительство. — 2015. — № 1. — С. 93–102.

23. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление / С. Н. Леонович и др.; под общ. ред. С. Н. Леоновича. — Минск: БНТУ, 2021. — 353 с.

24. Leonovich S. N. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction / S. N. Leonovich, E. E. Shalyi, L. V. Kim // Science and Technique. — 2019. — Vol. 18. — Iss. 4. — Pp. 284–291.

25. Шалый Е. Е. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель / Е. Е. Шалый и др. // Вестник гражданских инженеров. — 2018. — Т. 68. — № 3. — С. 123–131.
26. Duan Y. Corrosion prevention of steel bars in concrete using amine and epoxy compounds / Y. Duan, J. Y. Wang, L. Wang // Construction and Building Materials. — 2018. — Vol. 170. — Pp. 692–700.
27. Liu Y. Corrosion inhibition of reinforcing steel in concrete by plant exudates / Y. Liu, Y. Wang, W. Li // Materials and Corrosion. — 2022. — Vol. 73. — Iss. 6. — Pp. 1536–1544.
28. Li Y. Corrosion inhibition of Graphene oxide for steel in concrete / Y. Li, X. Zou, F. Zhao, L. Ma // Corrosion Science. — 2019. — Vol. 153. — Pp. 240–249.
29. Afrasiyabi M. Corrosion of steel in concrete: A review / M. Afrasiyabi, A. A. Ramezaniapour, M. Ghanbari // Construction and Building Materials. — 2017. — Vol. 141. — Pp. 835–851. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.186.
30. Daniyal M. Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review / M. Daniyal, S. Akhtar // Journal of Building Pathology and Rehabilitation. — 2020. — Vol. 5. — P. 1. — DOI: 10.1007/s41024-019-0067-3.
31. Geiker M. R. Experimental support for new electro active repair method for reinforced concrete / M. R. Geiker, R. B. Polder // Material Corrosion. — 2016. — Vol. 67. — Pp. 600–606.
32. Белый А. А. Мониторинг инженерных конструкций путепровода по улице Бабура к Ташкентскому международному аэропорту имени Ислама Каримова / А. А. Белый, У. З. Шермухамедов, М. М. Собирова, Ш. Ш. Кадилова и др. // Путевой Навигатор. — 2025. — № 64(90). — С. 46–55.
- Дата поступления: 12.09.2025
Решение о публикации: 23.10.2025
- Контактная информация:**
АНТОНЮК Анатолий Анатольевич — инженер-исследователь, инженер; aaa.12.03.1992@mail.ru
БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Мосты и тоннели»²; технический директор³; академик Международной академии транспорта, академик Российской академии транспорта; andbeliy@mail.ru
КАДИРОВА Шарофат Шавкатовна — старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели»; irana_scorpion@mail.ru
МАХОНЬКО Андрей Андреевич — канд. техн. наук, начальник дорожно-эксплуатационной службы; Makhonkoaa@mail.ru

Feasibility and Prospects of Applying Electrolytic Protection Against Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Supports

A. A. Antonuk¹, A. A. Belyi^{2, 3}, Sh. Sh. Kadirova², A. A. Makhonko⁴

¹SINEREF-center LLC, 12, bld. 2, lit. A, office 403, Smolyachkova str., Saint Petersburg, 194044, Russia

²Tashkent State Transport University, 1, Temiryulchilar str., Mirabad District, Tashkent, Republic of Uzbekistan

³K2 Engineering LLC, 11, bld. 1, Shelepihenskoe shosse, Moscow, 123290, Russian Federation

⁴Highway Operator Nord LLC, 3A, lit. A, Volynsky per., Saint Petersburg, 191186, Russian Federation

For citation: Antonuk A. A., Belyi A. A., Kadirova Sh. Sh., Makhonko A. A. Feasibility and Prospects of Applying Electrolytic Protection Against Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Supports // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1073–1084. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1073-1084

Summary

Purpose: To analyze the engineering aspects, assess the effectiveness, and evaluate economic feasibility of implementing electrolytic protection (ELP) to mitigate corrosion, thereby prolong the service life and enhance the reliability of reinforced concrete bridge support structures subjected to chloride aggression. **Methods:** The research relies on a comprehensive review of scientific literature from databases such as Scopus, Web of Science, and RSCI, alongside with an analysis of regulatory and technical documents including ISO standards and national codes of practice, as well as results from field surveys. Mathematical modelling was utilized to determine the relationship between the corrosion rate, chloride concentration, and protective current density. Life Cycle Cost Analysis (LCCA) was conducted using specialized software to compare maintenance strategies. Field measurements of chloride ion content and stray current characteristics were performed. **Results:** The research illustrates an exponential increase in the corrosion rate at chloride concentrations above 0.4%, escalating from 2.43 to 177.01 $\mu\text{m}/\text{year}$. A corrosion reduction of up to 99% has been achieved at the current density of 10–15 mA/m^2 . ELP systems, which use an external current source, can prolong the service life of supports by a factor of 45, with an initial investment of approximately 450 USD/ m^2 . The Net Present Value (NPV) of costs decreases to USD 355 thousand, in contrast to USD 510 thousand allocated for conventional repairs. The optimal range for cathodic current density necessary for effective corrosion suppression has been determined to be between 5–15 mA/m^2 . **Practical significance:** The potential for integrating ELP into an infrastructure lifecycle management strategy has been demonstrated. This technology not only offers significant cost savings (1.5–2.5 times less than traditional methods) but also enhances bridge operational safety and facilitates a more efficient allocation of resources for the maintenance of transportation networks.

Keywords: Electrolytic protection (ELP), reinforcement corrosion, reinforced concrete supports, chloride aggression, cathodic polarization.

References

1. Surnin D. A. Ispol'zovanie tsinka dlya antikorroziionnoy zashchity mostov [The use of zinc for anticorrosion protection of bridges]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Technical regulation in transport construction]. 2022, Iss. 2 (53), pp. 60–66. (In Russian)

2. Matyunin D. Yu., Kaz'min S. A., Bosov A. B., Lobanov A. V. Primenenie protektrornykh splavov dlya zashchity ot korrozii morskikh ob'ektov [Application of

sacrificial alloys for corrosion protection of marine structures]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2024, Iss. 1(74), pp. 2–9. (In Russian)

3. Burkov A. K., Popov I. I. Kompleksnye resheniya elektrokhimicheskoy zashchity ot korrozii — oborudovanie i aspekty proektirovaniya [Integrated solutions for electrochemical corrosion protection — equipment and design aspects]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2025, Iss. 2, pp. 69–71. (In Russian)

4. Şirinova A. Y. Metal konstruksiyaların korroziyadan mühafizəsində elektokimyəvi katod mühafizə qurğuları. *Elmi xəbərlər. Təbiət və Texniki Elmlər Bölməsi*, 2024, vol. 24, Iss. 3, pp. 89–94.
5. Kaverinskiy V. S., Kaverinskiy D. V. *Novye metody zashchity ot korrozii* [New methods of corrosion protection]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye* [Paint and Varnish Materials and Their Application]. 2020, Iss. 5, pp. 10–14. (In Russian)
6. Anufriev N. G., Kuzenkov Yu. A. *Issledovanie korrozionnogo povedeniya alyuminiya 1980T1 v morskoy vode i burovom rastvore elektrokhimicheskimi metodami* [Study of the corrosion behavior of aluminum 1980T1 in seawater and drilling fluid using electrochemical methods]. *Praktika protivokorroziionnoy zashchity* [Practice of Anticorrosion Protection]. 2022, vol. 27, Iss. 3, pp. 7–30. (In Russian)
7. Zavarzin S. V., Oglodkov M. S., Chesnokov D. V., Kozlov I. A. *Vysokotemperaturnaya solevaya korroziya i zashchita materialov gazoturbinnnykh dvigateley (obzor)* [High-temperature salt corrosion and protection of gas turbine engine materials (review)]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2022, Iss. 3(109), pp. 121–134. (In Russian)
8. Garashko V. V. *Antikorroziionnaya zashchita shpuntovykh ograzhdeniy: tekhnologii, materialy i perspektivy* [Anticorrosion protection of sheet pile walls: technologies, materials, and prospects]. *Molodoy issledovatel' Dona* [Young Researcher of the Don]. 2025, vol. 10, Iss. 3(54), pp. 17–21. (In Russian)
9. Buziner Yu. L., Shmakov N. N. *Antikorroziionnoe pokrytie Ecomast dlya zashchity GTS v razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii* [Anticorrosion coating Ecomast for protection of hydraulic structures under various operating conditions]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2024, Iss. 4 (77), pp. 74–75. (In Russian)
10. Mikheeva O. V., Mirkina E. N., Mavzovin V. S. *Printsipy antikorroziionnoy zashchity truboprovodov* [Principles of anticorrosion protection of pipelines]. *Ekonomika stroitel'stva* [Construction Economics]. 2025, Iss. 1, pp. 356–359. (In Russian)
11. Reva Yu. V. *Elektrokhimicheskaya protektornaya zashchita aktivnykh chastey elektricheskikh mashin otkrytogo ispolneniya dlya sudov ledovogo klassa* [Electrochemical sacrificial protection of active parts of open-type electrical machines for ice-class vessels]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere* [Problems of Risk Management in the Technosphere]. 2022, Iss. 4 (64), pp. 104–110. (In Russian)
12. Zakharova P. I., Khorin A. V. *Novyy perspektivnyy korroziionnostoykiy material s povyshennym resursom raboty dlya preduprezhdeniya situatsiy tekhnogennogo kharaktera* [A new promising corrosion-resistant material with increased service life for preventing man-made situations]. *Molodezh' i nauka* [Youth and Science]. 2023, Iss. 9. (In Russian)
13. Pichugova L. N. *Zashchita ot korrozii na AES* [Corrosion protection at nuclear power plants]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Energy Installations and Technologies]. 2023, vol. 9, Iss. 4, pp. 74–83. (In Russian)
14. Bocharov V. A. *Tsinkirovanie — vysokoeffektivnaya zashchita ot korrozii* [Zinc plating — highly effective corrosion protection]. *Gidrotekhnika* [Hydraulic Engineering]. 2024, Iss. 1 (74), pp. 62–64. (In Russian)
15. Revin P. O., Makarenko A. V. *Issledovanie dolgovechnosti antikorroziionnykh pokrytiy dlya zashchity prichal'nykh sooruzheniy* [Study of durability of anticorrosion coatings for protection of berthing structures]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov* [Science and Technologies of Pipeline Transportation of Oil and Oil Products]. 2022, vol. 12, Iss. 5, pp. 470–479. (In Russian)
16. Ovchinnikova T. A., Marinin A. N., Ovchinnikov I. G. *Korroziya i antikorroziionnaya zashchita zhelezobetonnykh mostovykh konstruksiy* [Corrosion and anticorrosion protection of reinforced concrete bridge structures]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* [Internet journal "Naukovedenie"]. 2014, Iss. 5 (24). (In Russian)
17. Migunov V. N., Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G. *Ekspperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstruksiy v usloviyakh korrozii: monografiya* [Experimental and theoretical modeling of reinforced structures under corrosion conditions: monograph]. Penza: PGUAS Publ., 2014, 294 p. (In Russian)
18. Stepanova V. F., Rozental' N. K., Moiseeva N. A. *Katodnaya elektrokhimicheskaya zashchita armatury ot korrozii v zhelezobetonnykh konstruksiyakh* [Cathodic electrochemical protection of reinforcement against corrosion in reinforced concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2023, Iss. 12, pp. 46–50. (In Russian)
19. Dang V. Q., Ogawa Y., Bui P. T., Kawai K. *Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious*

materials under an accelerated carbonation condition. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 274, p. 122016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122016.

20. Shalyy E. E., Leonovich S. N., Kim L. V. *Dolgovechnost' morskikh sooruzheniy pri kombinirovannoy korrozii zhelezobetona* [Durability of marine structures under combined corrosion of reinforced concrete]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Materials. Structures. Technologies]. 2018, Iss. 1 (5), pp. 65–72. (In Russian)

21. Leonovich S. N., Stepanova A. V., Tsuprik V. G., Kim L. V. et al. *Dolgovechnost' betona pri khloridnoy agressii: monografiya* [Durability of concrete under chloride aggression: monograph]. Vladivostok: Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet Publ., 2020, 90 p. (In Russian)

22. Karpenko N. I., Yarmakovskiy V. N., Erofeev V. T. *O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy* [On modern methods of ensuring durability of reinforced concrete structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2015, Iss. 1, pp. 93–102. (In Russian)

23. Leonovich S. N. et al. *Prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy pri kombinirovannom vozdeystvii karbonizatsii i khloridnoy agressii i ikh vosstanovlenie* [Prediction of durability of reinforced concrete structures under combined effect of carbonation and chloride attack and their rehabilitation]. Minsk: BNTU Publ., 2021, 353 p. (In Russian)

24. Leonovich S. N., Shalyi E. E., Kim L. V. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction. *Science and Technique*, 2019, vol. 18, Iss. 4, pp. 284–291.

25. Shalyy E. E. et al. *Sovmestnoe deystvie karbonizatsii i khloridnoy agressii na konstruktsionnyy beton: veroyatnostnaya model'* [Combined effect of carbonation and chloride attack on structural concrete: probabilistic model]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2018, vol. 68, Iss. 3, pp. 123–131. (In Russian)

26. Duan Y., Wang J. Y., Wang L. Corrosion prevention of steel bars in concrete using amine and epoxy compounds.

Construction and Building Materials, 2018, vol. 170, pp. 692–700.

27. Liu Y., Wang Y., Li W. Corrosion inhibition of reinforcing steel in concrete by plant exudates. *Materials and Corrosion*, 2022, vol. 73, Iss. 6, pp. 1536–1544.

28. Li Y., Zou X., Zhao F., Ma L. Corrosion inhibition of Graphene oxide for steel in concrete. *Corrosion Science*, 2019, vol. 153, pp. 240–249.

29. Afrasiyabi M., Ramezaniapour A. A., Ghanbari M. Corrosion of steel in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 141, pp. 835–851. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.186.

30. Daniyal M., Akhtar S. Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2020, vol. 5, p. 1. DOI: 10.1007/s41024-019-0067-3.

31. Geiker M. R., Polder R. B. Experimental support for new electro active repair method for reinforced concrete. *Material Corrosion*, 2016, vol. 67, pp. 600–606.

32. Bely A. A., Shermukhamedov U. Z., Sobirova M. M., Kadirova Sh. Sh. et al. Monitoring inzhenernykh konstruktsiy puteprovoda po ulitse Babura k Tashkentскому mezhdunarodnomu aeroportu imeni Islama Karimova [Monitoring of engineering structures of the overpass along Babur Street to Tashkent International Airport named after Islam Karimov]. *Putevoy Navigator* [Track Navigator]. 2025, Iss. 64 (90), pp. 46–55. (In Russian)

Received: September 12, 2025

Accepted: October 23, 2025

Author's information:

Anatoliy A. ANTONYUK — Research Engineer, Engineer; aaa.12.03.1992@mail.ru

Andrey A. BELYI — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department of Bridges and Tunnels²; Technical Director³; Member of International Transport Academy, Member of Russian Transport Academy; andbeliy@mail.ru

Sharofat Sh. KADIROVA — Senior Lecturer, Department of Bridges and Tunnels; irana_scorpion@mail.ru

Andrey A. MAKHONKO — PhD in Engineering, Head of the Road Maintenance Service; Makhonkooa@gmail.com

УДК 625.12:624.139

Учет теплопроводности инъекционных растворов при их комбинировании с охлаждающими устройствами в основании земляного полотна

Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис

Сибирской государственной университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Для цитирования: Разуваев Д. А., Печенкин Р. С., Ланис А. Л. Учет теплопроводности инъекционных растворов при их комбинировании с охлаждающими устройствами в основании земляного полотна // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1085–1095. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1085-1095

Аннотация

Цель: В определенных условиях деградация ММГ в основании земляного полотна транспортных сооружений сопровождается не только термическими просадками, но и формированием длительно консолидирующихся слабых грунтов с возможной потерей устойчивости откосов и расползанием насыпи. Для таких условий возможно применение комбинированного способа термостабилизации — инъектирование грунтоцементных растворов совместно с установкой парожидкостных СОУ. Для дальнейшего развития расчетно-теоретического аппарата данного способа термостабилизации в статье определены зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших инъекционных растворов от содержания вяжущего, а также выполнено численное моделирование термостабилизации модели грунтового массива для уточнения эффективности комбинированного способа (по коэффициенту теплообмена) относительно применения только парожидкостных СОУ. **Методы:** Поставлен и проведен лабораторный эксперимент по определению коэффициента теплопроводности растворов по методу стационарного теплового режима, выполнены теплотехнические расчеты в специализированном программном комплексе. **Результаты:** Определены зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов от содержания вяжущего в их составе, в воздушно-сухом состоянии и при полном водонасыщении, а также в мерзлом и талом состоянии. Установлено, что теплопроводность затвердевшего раствора значительно выше, чем исходного грунта в том же состоянии, причем существенный относительный эффект наблюдается уже при минимальном содержании вяжущего. **Практическая значимость:** Полученные зависимости рекомендуется использовать для решения практических задач при инъектировании грунтоцементных растворов в основания транспортных сооружений в районах распространения ММГ. Численное моделирование показало эффективность (по коэффициенту теплообмена) термостабилизации грунтового массива предложенным комбинированным способом относительно применения только парожидкостных СОУ, что требует учета при проектировании и расчетах.

Ключевые слова: Земляное полотно, грунты основания, слабые грунты, многолетнемерзлые грунты, инъектирование грунтов, инъекционные растворы, термостабилизация грунтов, охлаждающие устройства.

Введение

Согласно стратегии социально-экономического развития Ямало-Ненецкого автономного округа (далее — ЯНАО), совершенствование транспортно-логистической инфраструктуры является

одной из ключевых задач региона и Арктической зоны страны в целом. Обладая значительным природно-ресурсным потенциалом, округ входит в число стратегически важных регионов России, где реализуются крупные проекты в сфере добычи

углеводородов, возобновляемой энергетики и транзита грузов по маршруту «Северный морской путь». В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы надежной и безопасной эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры в условиях сурового климата Арктической зоны и деградации многолетнемерзлых грунтов (далее — ММГ) в основаниях [1, 2].

При этом довольно часто деградация ММГ в основании земляного полотна транспортных сооружений региона сопровождается не только термическими просадками, но и формированием длительно консолидирующихся слабых грунтов. Слабые грунты в основании способствуют не только проявлению продолжительных осадок земляного полотна, но и формируют условия для потери устойчивости откосов и расползания насыпи [3].

В современной геотехнике разработаны и успешно применяются эффективные технологии термостабилизации, основанные на различных принципах воздействия на грунтовый массив основания [4]. При этом показали свою эффективность как в России, так и в других странах подходы, основанные на комбинации различных способов термостабилизации грунтов, минимизирующих недостатки друг друга [5–7]. Так, концепция, предложенная авторами в [7], предусматривает объединение двух эффективных способов стабилизации грунтов оснований транспортных сооружений при деградации ММГ — напорного инъецирования грунтоцементных растворов [8–11] и охлаждения основания сезонно действующими охлаждающими устройствами (далее — СОУ) [12–14]. Применение СОУ позволяет компенсировать теплоту экзотермии цемента [7] при твердении инъецированного раствора, а также стабилизировать положение ММГ и предотвратить дальнейшие термические просадки. При этом применение напорного инъецирования грунтоцементных растворов позволяет стабилизи-

вать слабые грунты основания в таликовых зонах в достаточно короткие сроки, исключить возможное морозное пучение основания при восстановлении ММГ, повысить теплообороты СОУ за счет большего коэффициента теплопроводности грунтоцементных растворов, а также сократить потребности в количестве или мощности охлаждающих установок.

Для дальнейшего развития расчетно-теоретического аппарата описанного выше комбинированного способа стабилизации оснований транспортных сооружений при деградации ММГ поставлен лабораторный эксперимент по определению зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов (далее — ГЦР) от содержания вяжущего, а также выполнено численное моделирование термостабилизации модели грунтового массива для уточнения эффективности комбинированного способа (по коэффициенту теплообмена) относительно применения только парожидкостных СОУ.

Постановка и проведение лабораторного эксперимента

Величина коэффициента теплопроводности затвердевшего грунто-цементного инъекционного раствора имеет существенное значение при проектировании и расчете термостабилизации грунтового массива основания предложенным в [7] комбинированным способом. В некоторой нормативно-технической и справочной литературе представлены отрывочные данные о коэффициенте теплопроводности различных типов цементных растворов, в том числе грунтоцементов, однако они не учитывают специфику и возможную вариацию составов инъекционных растворов, а также водно-тепловые условия оснований транспортных сооружений в районах распространения ММГ, в которые планируется инъецирование и установка СОУ.

В связи с этим поставлен лабораторный эксперимент по определению коэффициента теплопроводности λ^p затвердевшего ГЦР в зависимости от количества цемента (Ц) в его составе, в воздушно-сухом состоянии и при полном водонасыщении образцов, а также в мерзлом и талом состоянии. Матрица лабораторного эксперимента представлена в табл. 1.

В качестве исходного грунтового материала использовалась супесь песчаная с числом пластичности $I_p = 5$ (грунт, широко применяемый в практике напорного инъецирования [7]), а в качестве вяжущего — клинкерный портландцемент ЦЕМ II 42,5Н по ГОСТ 31108. Граничные значения содержания вяжущего приняты по результатам исследований, представленных в [15].

Образцы для эксперимента изготавливались цилиндрической формы с диаметром $D = 100$ мм

и высотой $h = 19$ мм. Образцы ГЦР замешивались с оптимальным из условий подвижности водоненцементным отношением, заливались в формы и после нормального твердения водонасыщались с полным погружением в воду или высушивались до воздушно-сухого состояния (контроль по изменению массы образцов). Образцы без цемента (опыты 1.1–1.3) замешивались с водой до текучего состояния, заливались в формы и после стабилизации высушивались до воздушно-сухого состояния, а при необходимости водонасыщения — устанавливались в эксикатор с песчаной подушкой. Степень водонасыщения для соответствующих образцов составляла $S_r > 0,98$. Температурный диапазон образцов для испытаний составлял:

- в талом состоянии — $+2...+1$ °С;
- в мерзлом состоянии — $-1...-2$ °С.

Таблица 1. Матрица лабораторного эксперимента

№ опыта	Состав*, г/л		Состояние образцов	Количество образцов, шт.	Возраст, сут.	Определяемые характеристики
	Цемент	Грунт				
1.1	0	1950	Воздушно-сухое, талое	3	> 28	Коэффициент теплопроводности
1.2			Водонасыщенное, талое	3		
1.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
2.1	100	1850	Воздушно-сухое, талое	3		
2.2			Водонасыщенное, талое	3		
2.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
3.1	200	1750	Воздушно-сухое, талое	3		
3.2			Водонасыщенное, талое	3		
3.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
4.1	300	1650	Воздушно-сухое, талое	3		
4.2			Водонасыщенное, талое	3		
4.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
5.1	450	1500	Воздушно-сухое, талое	3		
5.2			Водонасыщенное, талое	3		
5.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
6.1	500	1450	Воздушно-сухое, талое	3		
6.2			Водонасыщенное, талое	3		
6.3			Водонасыщенное, мерзлое	3		
поверка	сталь					
поверка	фторопласт Ф-4					

* — расход основных материалов для приготовления 1 литра раствора, г.

Указанные условия близки к температурам оснований транспортных сооружений в районах распространения ММГ.

Следует отметить, что конечная плотность затвердевших образцов ГЦР не является регулируемым параметром при инъектировании и в рамках настоящего эксперимента не исследовалась.

Для последующей поверки экспериментальной установки дополнительно изготовлены образцы идентичной формы из материалов с заведомо известным коэффициентом теплопроводности: стали (λ значительно выше, чем у ГЦР) и фторопласта Ф-4 (λ значительно ниже, чем у ГЦР). Общий вид подготовленных образцов представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид подготовленных образцов (выполнено авторами).

Слева направо: образец из стали; образец из фторопласта Ф-4; образец грунтоцементного раствора (ГЦР) для опыта 2.1

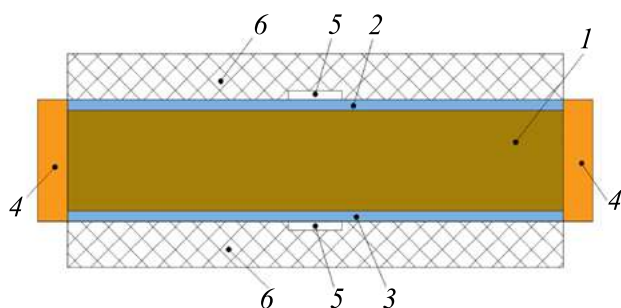


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки (выполнено авторами):

1 — испытуемый образец; 2 — верхний тепломер; 3 — нижний тепломер; 4 — теплоизоляционный кожух; 5 — датчик температуры; 6 — термостатирующие элементы

Лабораторный эксперимент по определению коэффициента теплопроводности ГЦР проводился по методу стационарного теплового режима с выполнением обязательных условий ГОСТ Р 71038—2023. Сущность метода заключается в формировании теплового потока сквозь плоский образец при создании градиента температур на его торцах. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

В ходе эксперимента испытуемый образец помещался в экспериментальную установку и термостатировался в климатической камере до постоянной температуры $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для испытаний в талом состоянии образцов и $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для испытаний в мерзлом состоянии. Термостатирование контролировалось с помощью верхнего и нижнего температурных датчиков. При достижении термостабилизации включался регистратор данных с датчиков тепловых потоков и начиналась запись данных. Далее задавался температурный градиент, равный $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом для испытаний в талом состоянии образцов на верхнем термостатирующем элементе устанавливалась температура $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, на нижнем — $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для испытаний в мерзлом состоянии образцы выдерживались при температурах $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (верхний элемент) и $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (нижний элемент).

Фиксация данных датчиков температуры и датчиков теплового потока выполнялась в автоматическом режиме каждые 5 мин. Запись данных производилась на карту памяти считывающего устройства с последующим экспортированием на ПК. Испытание завершалось при достижении стабилизации значений температуры на верхнем и нижнем торцах образца и достижении стабилизации теплового потока. Общий вид экспериментальной установки с установленным образцом ГЦР представлен на рис. 3.

Значения коэффициентов теплопроводности образцов λ_i определялись по формуле:

$$\lambda_i = \frac{(Q_{H,i} + Q_{B,i})h}{2(T_{B,i} - T_{H,i})}, \quad (1)$$

где $Q_{H,i}$ — значение теплового потока на нижнем термостатирующем элементе, Вт/м²;

$Q_{B,i}$ — значение теплового потока на верхнем термостатирующем элементе, Вт/м²;

$T_{B,i}$ — значение температуры нижнего торца образца, °C;

$T_{H,i}$ — значение температуры нижнего торца образца, °C.

h — высота образца, м.



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки (выполнено авторами)

Результаты лабораторного эксперимента

Поверочные опыты, выполненные на образцах из стали и фторопласта 4-Ф, показали высокую сходимость экспериментальных данных и известных значений коэффициентов теплопроводности указанных материалов, что подтверждает корректность работы собранной экспериментальной установки.

Каждый опыт выполнялся на трех образцах одного состава (из одного замеса ГЦР). За результат опыта принималось среднее значение коэффициента теплопроводности по трем испытаниям. Зависимости коэффициента теплопроводности λ^p затвердевшего ГЦР от исследованных факторов эксперимента представлены на рис. 4.

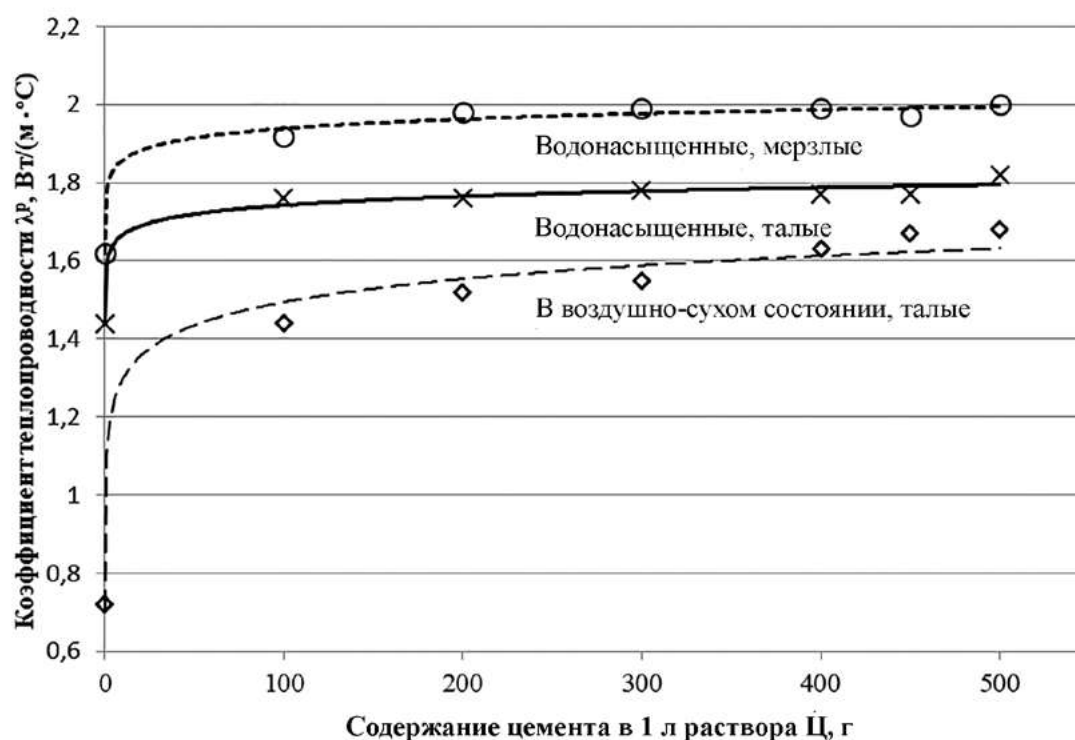


Рис. 4. Зависимости коэффициента теплопроводности затвердевшего ГЦР от исследованных факторов эксперимента (выполнено авторами)

Полученные зависимости (рис. 4) с высокими коэффициентами достоверности (более 0,98) аппроксимируются логарифмическими уравнениями:

$$\lambda_f^p = 0,0347 \ln(\Pi) + 1,779, \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{вл}}^p = 0,0326 \ln(\Pi) + 1,592, \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{в/с}}^p = 0,0853 \ln(\Pi) + 1,1012, \quad (4)$$

где λ_f^p — коэффициент теплопроводности водонасыщенного ГЦР в мерзлом состоянии;

$\lambda_{\text{вл}}^p$ — коэффициент теплопроводности водонасыщенного ГЦР в талом состоянии;

$\lambda_{\text{в/с}}^p$ — коэффициент теплопроводности талого ГЦР в воздушно-сухом состоянии;

Π — содержание цемента в 1 л раствора, г.

Уравнения (2)–(4) рекомендуется использовать для решения практических задач в пределах граничных условий проведенных испытаний (значения содержания цемента в растворе Π от 100 до 500 г на литр раствора). Как показали исследования [15], при содержании цемента в ГЦР менее 100 г/л затвердевший раствор нестабилен при водонасыщении и не рекомендуется к применению.

Анализ полученных зависимостей показал, что теплопроводность затвердевшего грунтоцементного раствора значительно выше, чем исходного грунта в том же состоянии. Даже при минимальном содержании цемента (100 г на литр раствора) теплопроводность образцов относительно исходного грунта повышается в 2 раза в воздушно-сухом состоянии, на 22 % при полном водонасыщении и на 19 % в мерзлом состоянии. В диапазоне значений содержания цемента в ГЦР от 100 до 500 г на литр раствора количество вяжущего Π уже не является значимым фактором, влияющим на теплопроводность. Только в воздушно-сухом состоянии образцов при увеличении содержания цемента в ГЦР закономерно увеличивается их коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности затвердевшего ГЦР (в диапазоне содержания цемента

от 100 до 500 г на литр раствора) существенно увеличивается при водонасыщении и далее при промерзании образцов. Если в воздушно-сухом состоянии образцов ГЦР коэффициент теплопроводности меняется в пределах от 1,44 до 1,68 (среднее значение 1,58) Вт/(м · °С), то в водонасыщенном состоянии от 1,76 до 1,82 (среднее значение 1,78) Вт/(м · °С), а в мерзлом состоянии от 1,92 до 2,00 (среднее значение 1,97) Вт/(м · °С).

С точки зрения управления теплопроводностью грунтоцементных инъекционных растворов увеличение количества вяжущего в материале не представляется целесообразным. При этом использование инъекционных растворов с минимальным содержанием вяжущего экономически более оправдано. Кроме того, такой подход приводит к меньшему растеплению многолетнемерзлых грунтов (ММГ) за счет экзотермии цемента при твердении.

На основании результатов лабораторного эксперимента становится возможным проведение сравнительного численного моделирования. Его цель — анализ эффективности термостабилизации грунтового массива комбинированным способом (инъектирование грунтоцементного раствора (ГЦР) и установка парожидкостных сезонно действующих охлаждающих устройств (СОУ)) в сравнении с применением только парожидкостных СОУ. Эффективность оценивается по коэффициенту теплообмена.

Результаты численного моделирования

В рамках численного моделирования выполнен теплотехнический расчет в специализированном программном комплексе. Для решения поставленной задачи в качестве модели рассматривался грунтовый параллелепипед (размеры в плане 3,0 × 3,0 м, глубина 20,0 м) с установленным парожидкостным СОУ длиной 10 м. Модель имитирует отдельный элемент термостабилизируемого основания земляного полотна. Отметка кровли

ММГ моделировалась на глубине 10 м по нижней отметке установленного СОУ. Для моделирования задавались характерные для Арктической зоны ЯНАО грунтовые и климатические параметры.

Комбинированный способ термостабилизации (инъектирование ГЦР и установка парожидкостных СОУ) моделировался путем включения в модель на глубине с 5,0 до 10,0 м прослоев инъектированного затвердевшего раствора мощностью 0,3 м и шагом по глубине 0,8 м. Теплотехнические характеристики для раствора принимались по результатам проведенного лабораторного эксперимента и [7].

Была выполнена серия расчетов указанных выше моделей для первого после установки СОУ холодного периода года с варьированием исходной влажности термостабилизируемых талых грунтов основания.

На рис. 5 представлен пример распределения температурных полей по глубине моделей на 15 декабря первого холодного периода года — для модели с СОУ и модели с комбинированным

способом термостабилизации. Распределение температур показано для вертикали, проходящей на расстоянии 0,5 м от оси СОУ, в интервале глубин от 5,0 до 10,0 м (испарительная зона СОУ).

Аналогичные результаты получены для других периодов и расстояний от оси СОУ. Сравнительный анализ температурных полей после первого холодного периода года показал повышенный охлаждающий эффект при применении комбинированного способа термостабилизации.

По результатам серии расчетов, после определения эквивалентных коэффициентов теплообмена применяемых устройств установлено: комбинированный способ термостабилизации (в зависимости от влажности исходных талых грунтов) эффективнее применения СОУ по данному параметру. В рамках проведенных расчетов коэффициент теплообмена комбинированного устройства превысил показатель для СОУ до 8 %.

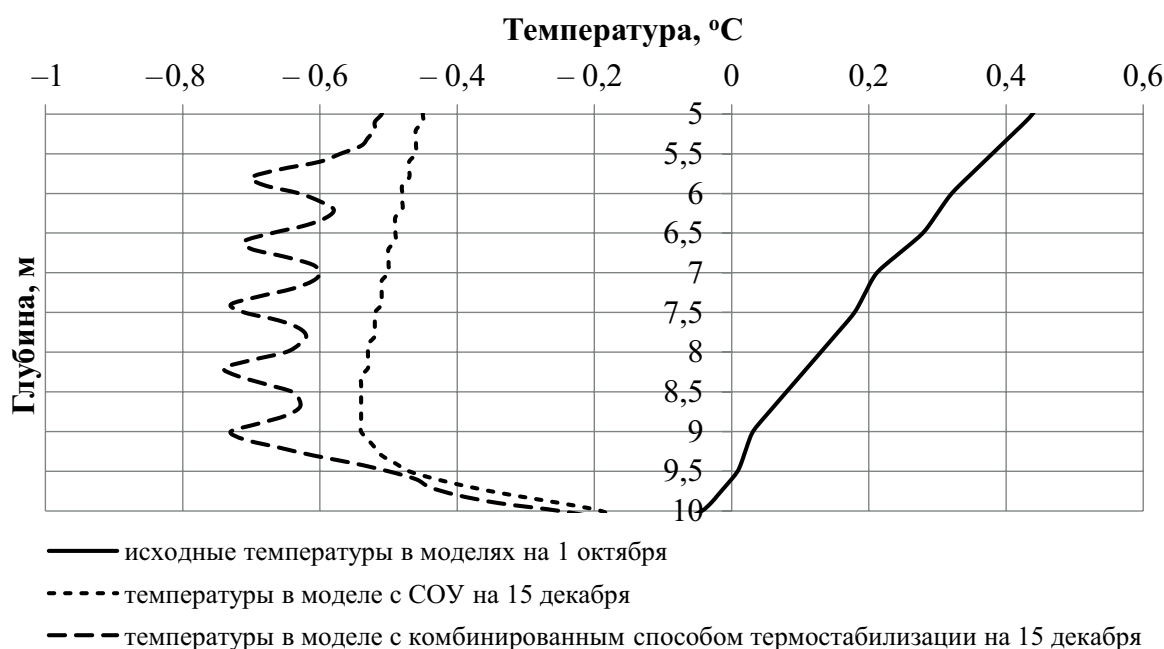


Рис. 5. Распределение полей температур по глубине моделей на 15 декабря первого холодного периода года (выполнено авторами)

Этот факт подтверждает влияние грунтоцементных инъекционных растворов на теплотехническую эффективность СОУ, что необходимо учитывать при проектировании комбинированного способа термостабилизации основания земляного полотна.

Заключение

Выполненный лабораторный эксперимент позволил определить зависимости коэффициентов теплопроводности затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов от содержания вяжущего в их составе, в воздушно-сухом состоянии и при полном водонасыщении, а также в мерзлом и талом состоянии. Полученные зависимости рекомендуется использовать для решения практических задач (в пределах граничных условий проведенных испытаний) при инъектировании ГЦР в основания транспортных сооружений в районах распространения ММГ.

Установлено, что теплопроводность затвердевшего грунтоцементного раствора значительно выше, чем исходного грунта в том же состоянии, причем существенный относительный эффект наблюдается уже при минимальном содержании вяжущего. Применение инъекционных растворов с минимальным количеством вяжущего экономически более оправдано. Кроме того, это приводит к меньшему растеплению многолетнемерзлых грунтов (ММГ) за счет экзотермии цемента при твердении.

Коэффициент теплопроводности затвердевшего грунтоцементного раствора (ГЦР) существенно возрастает при водонасыщении, а затем — при промерзании материала.

На основании полученных данных выполнено численное моделирование, которое подтвердило эффективность термостабилизации грунтового массива комбинированным способом (инъектирование грунтоцементного раствора (ГЦР) совместно с установкой парожидкостных сезонно-действующих охлаждающих устройств

(СОУ)) по сравнению с применением только парожидкостных СОУ. Эффективность оценена по коэффициенту теплообмена, что необходимо учитывать при проектировании и расчетах.

Несмотря на то что инъектирование ГЦР приводит к удорожанию охлаждающих установок, данный метод позволяет:

- сократить потребность в количестве или мощности СОУ за счет повышенного коэффициента теплопроводности грунтоцементных растворов;
- стабилизировать слабые грунты основания в таликовых зонах в достаточно короткие сроки;
- исключить возможное морозное пучение основания при восстановлении многолетнемерзлых грунтов (ММГ).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-20036 (<https://rscf.ru/project/24-19-20036/>) и правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

Список источников

1. Sakharov I. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov et al. // X International Scientific Siberian Transport Forum — TransSiberia 2022 (Novosibirsk, 02–05 March 2022). — Novosibirsk: B. V. Elsevier, 2022. — Pp. 2506–2514. — DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
2. Елисеев Д. О. Транспортная инфраструктура арктических регионов России в условиях деградации вечной мерзлоты / Д. О. Елисеев, Ю. В. Наумова // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2019. — № 10-1(56). — С. 113–118. — DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11226.
3. Ланис А. Л. Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщ-

щения. — 2025. — № 1(73). — С. 68–76. — DOI: 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

4. Цернант А. А. Инновационные технологии управления температурой грунтовых массивов транспортных сооружений в арктических широтах / А. А. Цернант // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2013. — № 3(170). — С. 26–31.

5. Дыдышко П. И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты / П. И. Дыдышко // Криосфера Земли. — 2017. — Т. 21. — № 4. — С. 43–57.

6. Gallavresi F. Ground freezing — the application of the mixed method (brine-liquid nitrogen) / F. Gallavresi // Engineering Geology. — 1981. — Vol. 18. — Iss. 1. — Pp. 361–375. — DOI: 10.1016/0013-7952(81)90074-0.

7. Разуваев Д. А. Стабилизация основания земляного полотна инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин // Мир транспорта. — 2024. — Т. 22. — № 1 (110). — С. 6–16. — DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1.

8. Lomov P. O. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions / P. O. Lomov, A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, M. G. Kavardakov // Sciences in Cold and Arid Regions. — 2021. — Vol. 13. — Iss. 5. — Pp. 357–365. — DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.

9. Ибрагимов М. Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов: монография / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин. — М.: АСВ, 2012. — 256 с.

10. Бабаскин Ю. Г. Укрепление грунтов инъектированием при ремонте автомобильных дорог / Ю. Г. Бабаскин. — Минск: Белорусский национальный технический университет, 2002. — 177 с.

11. Ланис А. Л. Метод напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство. — 2009. — № 2. — С. 32–34.

12. Ашпиз Е. С. Опыт сооружения земляного полотна железных дорог, расположенных на многолетнемерзлых грунтах: проблемы и пути их решения / Е. С. Ашпиз // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. — 2019. — № 1. — С. 21–27.

13. Liu H. Monitoring roadbed stability in permafrost area of Qinghai-Tibet Railway by MT-InSAR technology / H. Liu, S. Huang, C. Xie, B. Tian et al. // Land. — 2023. — Vol. 12. — P. 474. — DOI: 10.3390/land12020474.

14. Колосков Г. В. К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне / Г. В. Колосков, Э. В. Ибрагимов, Р. Г. Гамзаев // Геотехника. — 2015. — № 6. — С. 4–11.

15. Разуваев Д. А. Оптимизация составов инъекционных растворов для стабилизации слабого основания эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2025. — № 1(97). — С. 8–16. — DOI: 10.46973/0201-727X_2025_1_8.

Дата поступления: 31.10.2025

Решение о публикации: 29.11.2025

Контактная информация:

РАЗУВАЕВ Денис Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; razdenis@mail.ru

ПЕЧЕНКИН Роман Сергеевич — аспирант; pechenkinrs@gmail.com

ЛАНИС Алексей Леонидович — д-р техн. наук, проф.; alangeo@bk.ru

Considering Thermal Conductivity of Injection Solutions in Combination with Cooling Systems Within the Railway Formation Foundation

D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin, A. L. Lanis

Siberian State University of Railway Engineering, 191, Dusy Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

For citation: Razuvaev D. A., Pechenkin R. S., Lanis A. L. Considering Thermal Conductivity of Injection Solutions in Combination with Cooling Systems Within the Railway Formation Foundation // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1085–1095. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1085-1095

Summary

Purpose: Under specific conditions, the degradation of the permafrost soils in railway formation foundations is not only characterized by thermal subsidence, but also by the development of weak soils that consolidate over time, potentially leading to slope instability and embankment creep. In such scenarios, a combined thermal stabilization approach can be applied, which includes the injection of soil- cement solutions alongside the installation of vapour-liquid cooling systems (SCD). This research establishes the correlation between the thermal conductivity coefficients of hardened injection solutions and the binder content. It also conducts a numerical model of the thermal stabilization of a soil mass to assess the effectiveness of the combined method, measured by the heat transfer coefficient, in comparison with the application of vapour-liquid systems alone.

Methods: A laboratory experiment was set up and carried out to determine the thermal conductivity coefficient of solutions using the steady-state thermal regime method. Heat engineering calculations were performed using a specialized software package. **Results:** The dependences of the thermal conductivity coefficients of hardened soil-cement injection mortars on the binder content have been determined under various conditions, such as air-dry state, full water saturation, and frozen-thawed states. It has been established that the thermal conductivity of the hardened mortar is significantly greater than that of the original soil in equivalent conditions, with a notable relative impact observed even at minimal binder content.

Practical significance: The established relationships are recommended for addressing practical challenges associated with injecting soil-cement mortars into the foundations of transportation structures in areas where permafrost soils are prevalent. Numerical modelling has demonstrated that the combined method proposed for thermal stabilization of the soil mass is more effective in terms of heat exchange coefficient than relying solely on vapour-liquid soil-cement mixtures, highlighting the importance of this consideration in design and calculations.

Keywords: Formation, foundation soils, weak soils, permafrost soils, soil injection, injection solutions, soil thermal stabilization, cooling devices/systems.

References

1. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V. et al. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in the Arctic zone in conditions of global warming. X International Scientific Siberian Transport Forum — TransSiberia 2022 (Novosibirsk, 02–05 March 2022). Novosibirsk: B. V. Elsevier, 2022, pp. 2506–2514. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.

2. Eliseev D. O., Naumova Yu. V. Transportnaya infrastruktura arkticheskikh regionov Rossii v usloviyakh degradatsii vechnoy merzloty [Transport infrastructure of the Arctic regions of Russia under conditions of permafrost degradation]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economics and Business: Theory and Practice]. 2019, Iss. 10-1(56), pp. 113–118. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11226. (In Russian)

3. Lanis A. L., Razuvaev D. A., Usov D. A., Pechenkin R. S. Obosnovanie sistemy inzhenerno geokriologicheskogo monitoringa ekspluatiruemykh nasypov lineynykh transportnykh sooruzheniy v usloviyakh Yamalo Nenetskogo avtonomnogo okruga [Justification of the system of engineering-geocryological monitoring of operated embankments of linear transport structures in the conditions of the Yamalo-Nenets Autonomous District]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2025, Iss. 1(73), pp. 68–76. DOI: 10.52170/1815-9265_2025_73_68. (In Russian)
4. Tsernant A. A. Innovatsionnye tekhnologii upravleniya temperaturoy gruntovykh massivov transportnykh sooruzheniy v arkticheskikh shirotyakh [Innovative technologies for temperature control of soil masses of transport structures in Arctic latitudes]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century]. 2013, Iss. 3(170), pp. 26–31. (In Russian)
5. Dydyshko P. I. Deformatsii zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puti i ikh ustraneniye v usloviyakh vechnoy merzloty [Deformations of railway subgrade and their elimination under permafrost conditions]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth]. 2017, vol. 21, Iss. 4, pp. 43–57. (In Russian)
6. Gallavresi F. Ground freezing — the application of the mixed method (brine-liquid nitrogen). *Engineering Geology*. 1981, vol. 18, Iss. 1, pp. 361–375. DOI: 10.1016/0013-7952(81)90074-0.
7. Razuvaev D. A., Pechenkin R. S. Stabilizatsiya osnovaniya zemlyanogo polotna in'ektsionnym sposobom pri degradatsii mnogoletnemerzlykh gruntov [Stabilization of subgrade base by injection method under degradation of permafrost soils]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2024, vol. 22, Iss. 1 (110), pp. 6–16. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1. (In Russian)
8. Lomov P. O., Lanis A. L., Razuvaev D. A., Kavardakov M. G. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021, vol. 13, Iss. 5, pp. 357–365. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.
9. Ibragimov M. N., Semkin V. V. *Zakrepleniye gruntov in'ektsiei tsementnykh rastvorov: monografiya* [Soil stabilization by cement solution injection: monograph]. Moscow: ASV Publ., 2012, 256 p. (In Russian)
10. Babaskin Yu. G. *Ukrepleniye gruntov in'ektirovaniem pri remonte avtomobil'nykh dorog* [Soil strengthening by injection in road repair]. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet Publ., 2002, 177 p. (In Russian)
11. Lanis A. L. Metod napornoy in'ektsii dlya usileniya nasypov [Method of pressure injection for embankment strengthening]. *Put' i putevye khozyaystvo* [Track and Track Facilities]. 2009, Iss. 2, pp. 32–34. (In Russian)
12. Ashpiz E. S. Opyt sooruzheniya zemlyanogo polotna zheleznnykh dorog, raspolozhennykh na mnogoletnemerzlykh gruntakh: problemy i puti ikh resheniya [Experience in constructing railway subgrades on permafrost soils: problems and solutions]. *Byulleten' Ob'edinennogo uchenogo soveta OAO RZhD* [Bulletin of the United Scientific Council of JSC RZD]. 2019, Iss. 1, pp. 21–27. (In Russian)
13. Liu H., Huang S., Xie C., Tian B. et al. Monitoring roadbed stability in permafrost area of Qinghai-Tibet Railway by MT InSAR technology. *Land*. 2023, vol. 12, p. 474. DOI: 10.3390/land12020474.
14. Koloskov G. V., Ibragimov E. V., Gamzaev R. G. K voprosu vybora optimal'nykh sistem termostabilizatsii gruntov pri stroitel'stve v kriolitozone [On the issue of selecting optimal soil thermostabilization systems in construction in the cryolithozone]. *Geotekhnika* [Geotechnics]. 2015, Iss. 6, pp. 4–11. (In Russian)
15. Razuvaev D. A., Pechenkin R. S., Lanis A. L. Optimizatsiya sostavov in'ektsionnykh rastvorov dlya stabilizatsii slabogo osnovaniya ekspluatiruемого zemlyanogo polotna v kriolitozone [Optimization of injection solution compositions for stabilizing weak subgrade base in cryolithozone]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2025, Iss. 1(97), pp. 8–16. DOI: 10.46973/0201-727X_2025_1_8. (In Russian)

Received: October 31, 2025

Accepted: November 29, 2025

Author's information:

Denis A. RAZUVAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; razdenis@mail.ru

Roman S. PECHENKIN — Postgraduate Student; pechenkinrs@gmail.com

Alexey L. LANIS — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alangeo@bk.ru



УДК 007.52

Совершенствование телекоммуникационных подсистем для управления безопасностью применения автономных и полуавтономных коммерческих судов

К. С. Простакевич¹, А. Л. Абрамова¹, А. И. Честнов², И. А. Сикарев¹, В. М. Абрамов²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Российская Федерация, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79

²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Российская Федерация, 198035, Санкт-Петербург, Двинская улица, 5/7

Для цитирования: Простакевич К. С., Абрамова А. Л., Честнов А. И., Сикарев И. А., Абрамов В. М. Совершенствование телекоммуникационных подсистем для управления безопасностью применения автономных и полуавтономных коммерческих судов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1096–1105. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1096-1105

Аннотация

Цель: Разработать цифровой инструментарий, обеспечивающий автоматизацию архивирования результатов измерений параметров дождевых капель, влияющих на распространение радиоволн в атмосфере. Инструмент должен учитывать актуальные требования к совершенствованию телекоммуникационных подсистем, обеспечивающих безопасность эксплуатации автономных и полуавтономных коммерческих судов. **Методы:** Используются цифровые технологии для преобразования сообщений от автоматических измерителей параметров дождевых капель в архив результатов измерений в виде баз данных. **Результаты:** Разработан программный инструментарий для автоматизации архивирования данных измерений параметров капель дождя. Инструмент читает первичные телеграммы от измерителя, преобразует данные в удобный формат и архивирует их в базах данных. Также разработан алгоритм его применения. **Практическая значимость:** Сформированы научно-методическая и аппаратно-программная основы для дальнейших системных исследований влияния параметров капель дождя на надежность и помехоустойчивость каналов морской радиосвязи в составе телекоммуникационных подсистем для безопасной эксплуатации автономных и полуавтономных коммерческих судов. Полученные результаты могут быть эффективно применены в различных областях, включая сферу высшего образования.

Ключевые слова: Телекоммуникационные системы, автономные и полуавтономные суда, морская радиосвязь, дождь, управление безопасностью, базы данных, автоматизация архивирования.

Введение

Современное состояние научно-методического обеспечения (НМО) совершенствования телекоммуникационных подсистем (ТКПС) для управления безопасностью (УБ) применения автономных и полуавтономных коммерческих

судов (АПАКС) характеризуется существенной фрагментарностью и нуждается в значительном развитии и расширении. Определенный прогресс в данном направлении обусловлен современными исследованиями в области управления конфигурациями [1], применимыми для совершен-


```

do i = 1, 4096
  end = index(line(start:), ";")
  if (end == 0) then
    end = len
    exit
  end if
  PARSIVEL.MAS(i) = read_integer(line(start:start+end-2))
  start = start + end
end do

```

Рис. 2. Программа на языке Фортран для выделения четвертой строки телеграммы от ПАРС-2, ее чтения и записи в МД РИ ПКД

PARSIVEL%MAS(1)	991
PARSIVEL%MAS(2)	999
PARSIVEL%MAS(3)	999
PARSIVEL%MAS(4)	999
PARSIVEL%MAS(5)	999
PARSIVEL%MAS(6)	999
PARSIVEL%MAS(7)	999
PARSIVEL%MAS(8)	999
PARSIVEL%MAS(9)	999
PARSIVEL%MAS(10)	999
PARSIVEL%MAS(11)	999
PARSIVEL%MAS(12)	999
PARSIVEL%MAS(13)	999
PARSIVEL%MAS(14)	999
PARSIVEL%MAS(15)	999

Рис. 3. Фрагмент МД РИ ПКД

представляет собой матрицу размером 32×32 , где в строках отображаются фиксированные классы диаметров капель дождя, а в колонках — фиксированные классы скоростей капель дождя. Часть матрицы РИ ПКД приведена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что 7-й класс диаметра и 3-й класс скорости были зарегистрированы 195 раз. Для наглядности каждому классу было дано значение, чтобы проверять корректность записи и разложение на строки.

В саму базу данных (БД) РИ ПКД включается двумерный массив в формате float_8. Данный формат служит для хранения различных массивов с неограниченным числом элементов. Массив содержит 32 элемента, при этом каждый элемент состоит из строки, содержащей 32 значения, все они также разделены точкой с запятой. Для фор-

	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	33	34	35	36
3	65	66	67	68
4	97	98	99	100
5	129	130	131	132
6	161	162	163	164
7	193	194	195	196
8	224	225	226	227

Рис. 4. Часть матрицы РИ ПКД

мирования массива необходимо каждый элемент отделить фигурными скобками, сам массив по синтаксису SQL задается точно так же, в итоге получается массив массивов.

Чтобы преобразовать МД РИ ПКД в строку РИ ПКД, необходимо перебрать массив и записать каждый элемент в строку, преобразовав в нее каждый целочисленный элемент согласно индексу. Фрагмент фортран-программы для реализации указанной выше процедуры приведен на рис. 5. В данном фрагменте программы реализуется принцип цикла, отображенный на рис. 6, который состоит в следующем: создаются две строки, промежуточная и результирующая. В переменную iMatrixSize указывается размер матрицы, то есть количество элементов, необходимых для формирования каждой отдельной строки, пока не будет сформирована результирующая со всеми 1024 значениями. Каждая строка начинается с фигурной скобки. По циклу идет преобразование целочисленного значения в строку каждого элемента с разделением его запятой. Для того чтобы разделять по 32 элементам, используется принцип деления без остатка.

Когда элемент массива, `i` при делении на 32 не будет давать число в остатке, вместо запятой будут добавлены закрывающая фигурная скобка, запятая и открывающая фигурная скобка. После завершения цикла функцией `trim` удаляются лишние символы — пробелы и два последних знака. Затем строки заключаются в дополнительные фигурные скобки для формирования полноценного массива из 32 элементов.

В ходе окончательной выгрузки с помощью функции `len_trim` проверяется длина строки, которая затем сопоставляется с максимально допустимой длиной для формирования запроса.

Длина строки с массивом должна быть меньше предельно допустимого значения. В противном случае запрос окажется некоррект-

ным, что приведет к массовому возникновению ошибок в базе данных и существенной нагрузке на сервер.

Загрузка в БД под управлением системы управления базой данных (СУБД) происходит с помощью функции insert into (рис. 7). Из телеграммы необходимо извлечь дату и время для привязки РИ ПКД к моменту их получения.

После загрузки РИ ПКД необходимо проверить корректность выполнения запроса к СУБД. В результате в отчете должен отобразиться РИ ПКД в виде, приведенном на рис. 8.

Применение разработанного программного продукта (ПП) для архивации РИ ПКД целесообразно осуществлять в соответствии с алгоритмом, приведенном на рис. 9.

```
s1MatrixString = '{'
s2MatrixString = ''
do i = 1, size(PARSIVEL%MAS)
    write(s2MatrixString, '(I0, ",")') PARSIVEL%MAS(i)
    if (MOD(i, iMatrixSize) /= 0) THEN
        s1MatrixString = trim(s1MatrixString)//trim(s2MatrixString)
    else
        s2MatrixString = trim(s2MatrixString(:len_trim(s2MatrixString)-1))
        s1MatrixString = trim(s1MatrixString)//trim(s2MatrixString)//'}{'
    end if
end do
iLen = len_trim(s1MatrixString)
s1MatrixString = trim(s1MatrixString(:len_trim(s1MatrixString)-2))
```

Рис. 5. Цикл преобразования массива РИ ПКД в общую строку РИ ПКД

```
MatrixString = ''
do i = 1, size(PARSIVEL%MAS)
  write(s2MatrixString, '(I0, ",")') PARSIVEL%MAS(i)
  if (MOD(i, iMatrixSize) == 0) then
    s1MatrixString = trim(s1MatrixString)//trim(s2MatrixString)
  end if
end do
```

Рис. 6. Отображение принципа цикла создания строк

```
insert into meteo_point.sensor  
(source_id,measurand_id,time_obs,time_rec,value_float)  
values ('162','884','2023-07-02 14:47:48.000',timezone('UTC', NOW()),  
'{{991,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,  
991,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999,999
```

Рис. 7. Запрос на загрузку данных

А. К. Канаев, Э. В. Логин, И. С. Гришанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 2. — С. 266–275. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-266-275.

3. Sikarev A. A. Noise Immunity of Noncoherent Reception under Complex Interference Effect on Communication and Monitoring Channels of Automated Information Systems of River Transport on Inland Waterways of the Russian Federation / A. A. Sikarev, I. A. Sikarev, A. V. Garanin // Automatic Control and Computer Sciences. — 2009. — Vol. 52. — Iss. 8. — Pp. 1084–1089. — DOI: 10.3103/S01464116180802424.

4. Ныркoв А. П. О проблемах безопасности телекоммуникационных систем на внутренних водных путях / А. П. Ныркoв, И. А. Сикарев // Региональная информатика — 2008 (РИ-2008): XI Санкт-Петербургская международная конференция, Санкт-Петербург, 22–24 октября 2008 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургское общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2009. — С. 230–233.

5. Сикарев И. А. Сложные сигналы в адаптивных функционально устойчивых автоматизированных идентификационных системах на речном транспорте / И. А. Сикарев; Федеральное агентство морского и речного транспорта, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций». — Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. — 84 с.

6. Tatarnikova T. M. Botnet Attack Detection Approach in Out Networks / T. M. Tatarnikova, I. A. Sikarev, P. Yu. Bogdanov, T. V. Timochkina // Automatic Control and Computer Sciences. — 2022. — Vol. 56. — Iss. 8. — Pp. 838–846. — DOI: 10.3103/s0146411622080259.

7. Абрамов В. М. Автоматизированная обработка архивов метеорологических данных с помощью программы на языке Python / В. М. Абрамов, И. А. Сикарев, А. И. Честнов, А. А. Буцанец // Речной транспорт (XXI век). — 2022. — № 4(104). — С. 53–55.

8. Mikheev V. L. Northern Sea Route Development Under Climate Change and Covid-19 / V. L. Mikheev,

V. M. Abramov, V. G. Burlov et al. // Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference “Innovation Management and Information Technology Impact on Global Economy in the Era of Pandemic”, Cordoba, May 30–31, 2021. — Cordoba: IBIMA Publishing, 2021. — Pp. 5147–5153.

9. Карлин Л. Н. Анализ социально-экономической ситуации в арктических приморских субъектах Российской Федерации на основе индикаторной оценки морского потенциала / Л. Н. Карлин, В. М. Абрамов, Г. Г. Гогоберидзе, Ю. А. Леднова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2013. — № 30. — С. 181–188.

10. Vekshina T. V. Geoinformation Technologies for Assessing Arctic and Subarctic Riverbeds Throughput While Climate Change / T. V. Vekshina, V. M. Abramov, V. A. Bolshakov et al. // 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019: Conference Proceedings, Albena, June 30 — July 6, 2019. Vol. 19. — Albena: STEF92Technology LLC, 2019. — Pp. 903–910. — DOI: 10.5593/sgem2019/2.1/S08.117.

11. Sokolov A. G. Digital Transformation of Risk Management for Natural-Industrial Systems While Climate Change / A. G. Sokolov, V. M. Abramov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, St. Petersburg, November 21–22, 2019. — St. Petersburg, 2020. — P. 012003. — DOI: 10.1088/1757-899X/940/1/012003.

12. Abramov V. M. Geo-Information Tools Develop for Integrated Coastal Zone Management in Arctic and Subarctic / V. M. Abramov, A. G. Sokolov, E. A. Baikov et al. // Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Madrid, Spain, November 13–14, 2019. — Madrid, Spain: International Business Information Management Association, 2019. — Pp. 10763–10771.

13. Abramov V. M. Digital Technologies for Sea Ports Geo-Information Support While Climate Change and Covid-19 / V. M. Abramov, I. A. Sikarev, T. M. Tatarnikova et al. // 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA): Proceedings of the

36th IBIMA Conference, Granada, Spain, November 4–5, 2020. — Granada, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2020. — Pp. 8144–8152.

14. Istomin E. P. Clusters within Geospatial Information Management for Development of the Territory / E. P. Istomin, A. G. Sokolov, V. M. Abramov et al. // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, June 30 — July 6, 2016. Vol. 1. — Albena, Bulgaria: STEF92Technology LLC, 2016. — Pp. 601–608. — DOI: 10.5593/SGEM2016/B21/S08.075.

15. Kathiravelu G. Rain Drop Measurement Techniques: A Review / G. Kathiravelu, T. Lucke, P. Nichols // Water. — 2016. — Vol. 8. — Iss. 29. — Pp. 1–20. — DOI: 10.3390/w8010029.

16. OTT Parsivel²: Laser Weather Sensor / OTT Hydro-met. — URL: <https://www.ott.com/products/meteorological-sensors-26/ott-parsivel2-laser-weather-sensor-2392/> (дата обращения: 16.12.2024).

17. Сикарев И. А. Инфокоммуникационный инструмент для управления природными рисками при мореплавании автономных судов в Арктике при изменении климата / И. А. Сикарев, В. М. Абрамов, К. С. Простакевич и др. // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2024. — № 1(58). — С. 110–120. — DOI: 10.48612/jisp/v28t-z3kr-nrn2.

18. Shilin M. Innovative Technologies for Geo-Ecological Support While Artificial Coastal Territories Development / M. Shilin, V. M. Abramov, E. S. Andreeva et al. // 19th International Multidisciplinary Scientific

Geoconference SGEM 2019: Conference Proceedings. Ecology and Environmental Protection, Albena, June 30 — July 6, 2019. — Vol. 19. — Sophia: STEF92Technology LLC, 2019. — Pp. 399–406. — DOI: 10.5593/sgem2019/5.1/S20.050.

19. Abramov V. M. Digital Learning Technologies Development for University Education in Environmental Economics / V. M. Abramov, N. N. Popov, E. M. Korinets et al. // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA 2019), Madrid, November 13–14, 2019. — Madrid: International Business Information Management Association, 2019. — Pp. 9409–9417.

Дата поступления: 27.08.2025

Решение о публикации: 06.10.2025

Контактная информация:

ПРОСТАКЕВИЧ Константин Сергеевич — аспирант;
atombyfreund@mail.ru

АБРАМОВА Александра Леонидовна — аспирант;
alexandria567@mail.ru

ЧЕСТНОВ Арсений Ильич — соискатель;
arsenij430@gmail.com

СИКАРЕВ Игорь Александрович — д-р техн. наук,
проф.; sikarev@yandex.ru

АБРАМОВ Валерий Михайлович — канд. физ.-мат.
наук, доц.; val.abramov@mail.ru

Potential for Improving Telecommunication Subsystems to Enhance Safety Management in Autonomous and Semi-Autonomous Commercial Vessels

K. S. Prostakevich¹, A. L. Abramova¹, A. I. Chestnov², I. A. Sikarev¹, V. M. Abramov²

¹Russian State Hydrometeorological University, 79, Voronezhskaya str., Saint Petersburg, 192007, Russian Federation

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str., Saint Petersburg, 198035, Russian Federation

For citation: Prostakevich K. S., Abramova A. L., Chestnov A. I., Sikarev I. A., Abramov V. M. Potential for Improving Telecommunication Subsystems to Enhance Safety Management in Autonomous and Semi-Autonomous Commercial Ships // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1096–1105. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1096-1105

Summary

Purpose: To develop digital tools to automate the archiving of raindrop parameter measurements. These measurements are crucial for understanding their impact on radio wave propagation in the atmosphere and need to be taken into account for improving telecommunication subsystems designed to ensure the safety of autonomous and semi-autonomous commercial vessels. **Methods:** Digital technologies were employed to transform data from automatic raindrop parameter meters into archived measurement results in the form of databases. **Results:** A comprehensive software has been developed for the automated archiving of raindrop parameter measurement data. This software product is designed to interface with automatic raindrop parameter meters, facilitating the extraction of telemetry data. Through data transformation, the software converts the measurements into a standardized format optimized for storage. Subsequently, the processed data is efficiently integrated into database systems, ensuring the accessibility of the archived information. An algorithmic framework has been formulated to guide the implementation of this toolset. **Practical significance:** The scientific, methodological, and software foundations have been created for a comprehensive investigation into the influence of raindrop parameters on the reliability and noise immunity of marine radio communication channels within telecommunication subsystems throughout the safe operation of autonomous and semi-autonomous commercial vessels. The findings derived from this research can be employed in a variety of fields, including higher education system.

Keywords: Telecommunication systems, autonomous and semi-autonomous vessels, maritime radio communication, rain, safety management, databases, automation of archiving.

References

1. Kanaev A. K., Login E. V., Pudovkina K. Dekompozitsiya protsessov upravleniya dannymi v CMDB [Decomposition of data management processes in CMDB]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023, vol. 20, Iss. 1, pp. 151–160. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-151-160. (In Russian)
2. Kanaev A. K., Login E. V., Grishanov I. S. Kompleksnyy algoritm protsessov kontrolya i upravleniya

telekommunikatsionnoy set'yu Carrier Ethernet s primeneniem mekhanizmov OAM [A comprehensive algorithm for monitoring and managing a Carrier Ethernet telecommunication network using OAM mechanisms]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 2, pp. 266–275. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-266-275. (In Russian)

3. Sikarev A. A., Sikarev I. A., Garanin A. V. Noise Immunity of Noncoherent Reception under Complex

Interference Effect on Communication and Monitoring Channels of Automated Information Systems of River Transport on Inland Waterways of the Russian Federation. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 52, Iss. 8, pp. 1084–1089. DOI: 10.3103/S01464116180802424.

4. Nyrkov A. P., Sikarev I. A. O problemakh bezopasnosti telekommunikatsionnykh sistem na vnutrennikh vodnykh putyakh [On the problems of security of telecommunication systems on inland waterways]. *Regional'naya informatika — 2008 (RI-2008): XI Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya, Sankt-Peterburg, 22–24 oktyabrya 2008 goda* [Regional Informatics — 2008: 11th Saint Petersburg International Conference, St. Petersburg, October 22–24, 2008]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskoe obshchestvo informatiki, vychislitel'noy tekhniki, sistem svyazi i upravleniya Publ., 2009, pp. 230–233. (In Russian)

5. Sikarev I. A. *Slozhnye signaly v adaptivnykh funktsional'no ustoychivyykh avtomatizirovannykh identifikatsionnykh sistemakh na rechnom transporte. Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta, Federal'noe gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya “Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet vodnykh kommunikatsiy”* [Complex signals in adaptive functionally stable automated identification systems in river transport, Federal Agency for Maritime and River Transport, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “St. Petersburg State University of Water Communications”]. St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikeskogo universiteta Publ., 2010, 84 p. (In Russian)

6. Tatarnikova T. M., Sikarev I. A., Bogdanov P. Yu., Timochkina T. V. Botnet Attack Detection Approach in Out Networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2022, vol. 56, Iss. 8, pp. 838–846. DOI: 10.3103/s0146411622080259.

7. Abramov V. M., Sikarev I. A., Chestnov A. I., Butsanets A. A. Avtomatizirovannaya obrabotka arkhivov meteorologicheskikh dannykh s pomoshch'yu programmy na yazyke Python [Automated processing of meteorological data archives using a Python program]. *Rechnoy transport*

(*XXI vek*) [River Transport (21st Century)]. 2022, Iss. 4(104), pp. 53–55. (In Russian)

8. Mikheev V. L., Abramov V. M., Burlov V. G. et al. Northern Sea Route Development Under Climate Change and Covid-19. Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference “Innovation Management and Information Technology Impact on Global Economy in the Era of Pandemic”, Cordoba, May 30–31, 2021. Cordoba: IBIMA Publishing, 2021, pp. 5147–5153.

9. Karlin L. N., Abramov V. M., Gogoberidze G. G., Lednova Yu. A. Analiz sotsial'no-ekonomicheskoy situatsii v arkticheskikh primorskikh sub'ektakh Rossiyskoy Federatsii na osnove indikatornoy otsenki morskogo potentsiala [Analysis of the socio-economic situation in the Arctic coastal regions of the Russian Federation based on an indicator assessment of marine potential]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]. 2013, Iss. 30, pp. 181–188. (In Russian)

10. Vekshina T. V., Abramov V. M., Bolshakov V. A. et al. Geoinformation Technologies for Assessing Arctic and Subarctic Riverbeds Throughput While Climate Change. 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019: Conference Proceedings, Albena, June 30 — July 6, 2019, vol. 19, Albena: STEF92 Technology LLC, 2019, pp. 903–910. DOI: 10.5593/sgem2019/2.1/S08.117.

11. Sokolov A. G., Abramov V. M. et al. Digital Transformation of Risk Management for Natural Industrial Systems While Climate Change. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, St. Petersburg, November 21–22, 2019, St. Petersburg, 2020, p. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/940/1/012003.

12. Abramov V. M., Sokolov A. G., Baikov E. A. et al. Geo-Information Tools Develop for Integrated Coastal Zone Management in Arctic and Subarctic. Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Madrid, Spain, November 13–14, 2019, Madrid, Spain: International Business Information Management Association, 2019, pp. 10763–10771.

13. Abramov V. M., Sikarev I. A., Tatarnikova T. M. et al. Digital Technologies for Sea Ports Geo-Information Support While Climate Change and Covid-19. 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA): Proceedings of the 36th IBIMA Conference, Granada, Spain, November 4–5, 2020, Granada, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2020, pp. 8144–8152.
14. Istomin E. P., Sokolov A. G., Abramov V. M. et al. Clusters within Geospatial Information Management for Development of the Territory. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, June 30 — July 6, 2016, vol. 1, Albena, Bulgaria: STEF92 Technology LLC, 2016, pp. 601–608. DOI: 10.5593/SGEM2016/B21/S08.075.
15. Kathiravelu G., Lucke T., Nichols P. Rain Drop Measurement Techniques: A Review. *Water*, 2016, vol. 8, Iss. 29, pp. 1–20. DOI: 10.3390/w8010029.
16. OTT Parsivel². Laser Weather Sensor. OTT Hydromet. Available at: <https://www.ott.com/products/meteorological-sensors-26/ott-parsivel2-laser-weather-sensor-2392/> (accessed: December 16, 2024).
17. Sikarev I. A., Abramov V. M., Prostakevich K. S. et al. Infokommunikatsionnyy instrumentariy dlya upravleniya prirodnymi riskami pri moreplavanii avtonomnykh sudov v Arktike pri izmenenii klimata [ICT tools for natural risk management in autonomous vessel navigation in the Arctic under climate change]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems]. 2024, Iss. 1(58), pp. 110–120. DOI: 10.48612/jisp/v28t-z3kr-nrn2. (In Russian)
18. Shilin M., Abramov V. M., Andreeva E. S. et al. Innovative Technologies for Geo-Ecological Support While Artificial Coastal Territories Development. 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019: Conference Proceedings. Ecology and Environmental Protection, Albena, June 30 — July 6, 2019, vol. 19. Sophia: STEF92 Technology LLC, 2019, pp. 399–406. DOI: 10.5593/sgem2019/5.1/S20.050.
19. Abramov V. M., Popov N. N., Korinets E. M. et al. Digital Learning Technologies Development for University Education in Environmental Economics. Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA 2019), Madrid, November 13–14, 2019. Madrid: International Business Information Management Association, 2019, pp. 9409–9417.

Received: August 27, 2025

Accepted: October 06, 2025

Author's information:

Konstantin S. PROSTAKEVICH — Postgraduate Student;
atombyfreund@mail.ru

Alexandra L. ABRAMOVA — Postgraduate Student;
alexandria567@mail.ru

Arseniy I. CHESTNOV — External PhD Student;
arsenij430@gmail.com

Igor A. SIKAREV — PhD in Engineering, Professor;
sikarev@yandex.ru

Valery M. ABRAMOV — PhD in Physics
and Mathematics, Associate Professor;
val.abramov@mail.ru

УДК 656.21

Комплексная система безопасности на железной дороге с применением FPV-дронов

А. Т. Попов, О. А. Сулова, М. А. Чехов, А. И. Малахов

Липецкий государственный технический университет, Российская Федерация, 398055, Липецк, ул. Московская, д. 30

Для цитирования: Попов А. Т., Сулова О. А., Чехов М. А., Малахов А. И. Комплексная система безопасности на железной дороге с применением FPV-дронов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 1106–1118. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1106-1118

Аннотация

Цель: Создание эффективной системы контроля инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечивающей непрерывное патрулирование состояния путей на протяженных участках. **Методы:** Методология исследования базируется на использовании современных беспилотных технологий, включающих автоматизированные системы управления полетами и обработки данных. Предложенная концепция предусматривает разделение железнодорожной сети на участки протяженностью 100–200 км с организацией базовых пунктов управления на станциях. Видеопоток с FPV-дронов будет передаваться на удаленный сервер, оснащенный искусственным интеллектом (ИИ), который, в зависимости от степени опасности возникающей угрозы, будет либо самостоятельно принимать решения, либо формировать список рекомендаций для последующей их передачи работникам железной дороги. В работе рассмотрены этапы внедрения предлагаемой технологии. Разработан алгоритм функционирования системы безопасности с использованием FPV-дронов, а также проанализированы различные варианты патрулирования — для каждого из них построены графики движения дронов. Кроме того, исследованы: нормативно-правовая база, потенциальные риски, экономическая эффективность проекта, а также вопрос идентификации БПЛА со стороны сотрудников железной дороги и населения. **Научная новизна:** Заключается в интеграции современных беспилотных технологий в существующую инфраструктуру железнодорожного транспорта, что позволяет создать эффективную и экономически целесообразную систему безопасности. Разработанная система может служить основой для дальнейшего развития технологий контроля за состоянием железнодорожных путей с использованием БПЛА. **Результаты:** Внедрение данной системы позволит: существенно повысить уровень безопасности железнодорожных перевозок, сократить время реагирования на возникающие угрозы, повысить качество контроля железных дорог и минимизировать влияние человеческого фактора на процесс мониторинга. **Практическая значимость:** Система безопасности на железнодорожном транспорте с применением FPV-дронов имеет большую практическую значимость и может быть использована на участках с повышенной террористической угрозой, в труднодоступных местах, в условиях чрезвычайных ситуаций для поиска розыскных работ и оценки последствий случившейся аварии или катастрофы, для оперативного контроля ремонтных работ на перегонах.

Ключевые слова: Безопасность на железнодорожном транспорте, приграничные регионы, чрезвычайные ситуации на железнодорожном транспорте, терроризм, FPV-дрон, искусственный интеллект, автоматическое принятие решений, система автономной работы дрона, рабочий цикл дрона, многокомплектность, варианты патрулирования.

Анализ статистики чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте

Железнодорожный транспорт во все годы своего существования и по сей день из-за своей доступности и дешевизны является наиболее востребованным как для пассажирских перевозок, так и для грузовых. Обеспечение безопасности на железнодорожном транспорте является приоритетным направлением деятельности всех структур отрасли, поскольку от этого зависит не только сохранность грузов и подвижного состава, но и, самое главное, — жизни и здоровье людей. На сегодняшний день железнодорожный транспорт является одним из наиболее безопасных среди остальных видов [1], однако на нем все равно случаются аварии, подробная статистика которых приведена ниже.

Согласно данным 2024 г., факторами, приводящими к чрезвычайным ситуациям, являются (рис. 1).

По месту происшествия чрезвычайные ситуации делятся следующим образом (рис. 2).

На основании актуальных данных террористические акты составляют незначительную долю от общего числа чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте (около 5 %), однако их социальная значимость и последствия крайне высоки [2, 3].

Цель, практическая значимость

Целью данной статьи является разработка комплексной системы безопасности железнодорожных участков, основанной на применении FPV-дронов. FPV-дрон (от англ. *First Person View* — «вид от первого лица») представляет собой современный беспилотный летательный аппарат, оснащенный специальной камерой и передовой системой трансляции видеоизображения. Особенность данного устройства заключается в том, что пилот получает возможность наблюдать за полетом в режиме реального вре-

мени, словно находясь непосредственно в воздушном судне [4, 5]. Предлагаемая система без затратных объездов на автомобилях или дрезинах будет обеспечивать мониторинг состояния пути и искусственных сооружений на перегонах в режиме реального времени, благодаря чему удастся оперативно выявлять потенциальные угрозы и акты незаконного вмешательства (АНВ) и своевременно реагировать на них.

Система безопасности на железнодорожном транспорте с применением FPV-дронов имеет



Рис. 1. Факторы, приводящие к чрезвычайным ситуациям на железнодорожном транспорте (выполнено авторами)



Рис. 2. Места происшествий чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте (выполнено авторами)

большую практическую значимость и может быть использована на участках с повышенной террористической угрозой, в труднодоступных местах, в условиях чрезвычайных ситуаций для поиска розыскных работ и оценки последствий случившейся аварии или катастрофы, для оперативного контроля ремонтных работ на перегонах.

Перед разработкой проекта была внимательно изучена статья Михаила Ивашевского [6], в которой говорится об интеллектуальных системах видеонаблюдения на железнодорожных переездах. Однако принцип работы нашего проекта отличается: вместо стационарных систем предусматривается использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных средствами фотовидеофиксации. Кроме того, данный проект будет внедряться не на одном виде железнодорожной инфраструктуры, а на протяженных участках железной дороги.

Преимущества FPV-дронов перед стационарными камерами видеонаблюдения

1. Мобильность и гибкость применения [5]:

- оперативное развертывание — возможность перемещения и установки в любой точке наблюдения;
- маневренность — способность облетать препятствия и получать обзор с разных ракурсов;
- адаптивность — возможность изменения высоты и угла обзора в реальном времени;
- многофункциональность — возможность установки различных датчиков и оборудования.

2. Качество мониторинга [5]:

- динамическое наблюдение — возможность отслеживания движущихся объектов;
- широкий охват — способность охватывать большие территории за короткое время;
- высокое разрешение — современные камеры обеспечивают качественную картинку в режиме реального времени.

3. Оперативность реагирования [5]:

- мгновенная оценка ситуации;
- быстрое принятие решений;
- точное позиционирование — способность быстро определить местоположение нарушителей.

4. Безопасность использования:

- дистанционное управление — минимизация риска для операторов;
- гибкая настройка маршрутов — возможность адаптации под конкретные задачи;
- автоматизация процессов — возможность программирования регулярных маршрутов патрулирования [5].

5. Экономическая эффективность:

- снижение затрат на монтаж и обслуживание по сравнению со стационарными камерами;
- оптимизация ресурсов — один FPV-дрон может заменить несколько стационарных камер;
- гибкое использование — возможность перераспределения ресурсов в зависимости от потребностей.

С помощью дрона можно обнаружить широкий спектр потенциальных угроз и нештатных ситуаций на железнодорожном полотне и прилегающей территории (табл. 1).

Основная идея проекта

Предлагаемая система обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте представляет собой комплексный подход к защите инфраструктуры, основанный на интеграции современных технологий беспилотной авиации и искусственного интеллекта (рис. 3). В ее основе лежит непрерывная передача видеопотока с FPV-дронов в режиме реального времени на удаленный сервер, оснащенный передовыми ИИ-технологиями. Работа системы строится на постоянном патрулировании территории дронами, которые в режиме реального времени транслируют видео на центральный сервер. Здесь специальные алгоритмы искусственного

Таблица 1. Потенциальные угрозы на железной дороге

Состояние путевой инфраструктуры	Внешние угрозы	Энерго-инфраструктура	Состояние искусственных сооружений	Прочее
– боковой выброс пути и его деформация; – оползни и смещения грунта в выемках; – сдвиги рельсовых стыков; – деформации шпал и креплений; – нарушения геометрии стрелочных переводов; – подтопления, размывы	– животные на путях; – нарушители правил безопасности; – лица в бедственном или неадекватном состоянии; – следы диверсий; – подозрительные предметы	– обрывы контактной сети; – повреждения опор; – механические повреждения проводов; – падение деревьев на линии электропередач	– дефекты мостовых конструкций; – повреждения путепроводов; – разрушения тоннельных входов; – деформации подпорных стенок; – дефекты водоотводных сооружений; – повреждения защитных сооружений	– саморасцепившийся подвижной состав; – автомобиль на железнодорожном переезде; – обвалы в горной местности; – деревья, угрожающие падением на пути

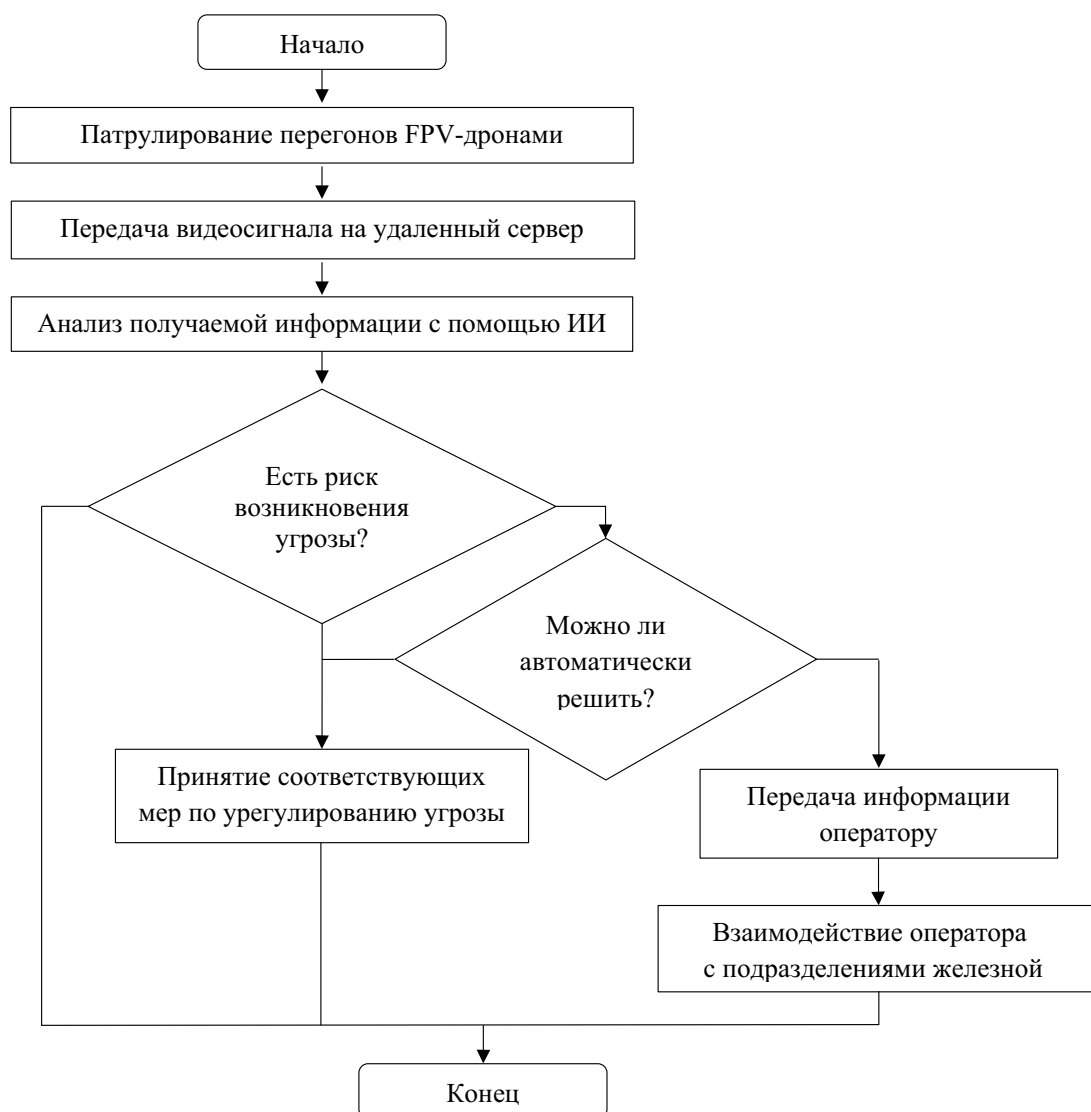


Рис. 3. Алгоритм работы системы безопасности с применением FPV-дронов (выполнено авторами)

интеллекта анализируют получаемую информацию, распознают потенциальные угрозы и автоматически классифицируют их по степени опасности. ИИ-система использует комплекс современных технологий, включая машинное обучение для распознавания образов, нейронные сети для анализа видеопотока, алгоритмы классификации для определения типа угрозы и системы прогнозирования развития событий. Функционал системы включает автоматическое обнаружение посторонних объектов и лиц, распознавание технических неисправностей, мониторинг состояния инфраструктуры и искусственных сооружений и прогнозирование развития внештатных ситуаций. При выявлении угрозы система может автоматически оповещать ответственных лиц, запускать протоколы безопасности, блокировать движение при необходимости, направлять дополнительные дроны для детального осмотра и координировать действия служб безопасности [7–9].

На первом этапе внедрения технологии патрулирования железной дороги наиболее рациональным является использование FPV-дронов с пилотируемым управлением. Такой подход позволит отработать все технологические процессы без применения сложных систем искусственного интеллекта. Важным аспектом является то, что оператор может мгновенно принимать решения на основе получаемой картинки, корректировать маршрут и фокусироваться на проблемных зонах. При этом не требуется сложных алгоритмов обработки данных и машинного обучения.

На следующем этапе, после отработки всех процессов и накопления достаточного опыта, можно будет внедрять элементы искусственного интеллекта для автоматизации рутинных операций и повышения эффективности системы. Это позволит постепенно перейти к более сложным технологиям, сохранив при этом надежность и безопасность работы. Такое поэтапное вне-

дрение обеспечит плавный переход к современным технологиям мониторинга с минимальными рисками и затратами.

Для эффективной эксплуатации системы предлагается возложить обязанности на специализированное подразделение. К примеру, можно создать центр компетенций по БПЛА в составе Центральной дирекции инфраструктуры (ЦДИ). Данный вариант является наиболее подходящим, так как сосредотачивает мониторинг железнодорожной инфраструктуры в едином подразделении, отвечающем за состояние путевого хозяйства и искусственных сооружений.

Концепция использования FPV-дронов для патрулирования железнодорожных путей

Ниже представлена сравнительная характеристика FPV-дронов для патрулирования железнодорожных путей, выполненной авторами (табл. 2).

При изучении существующих моделей FPV-дронов, потенциально способных на выполнение задач в ходе предлагаемого проекта, выбор пал на дрон российского производства ZALA 421-16E5G. Ключевыми преимуществами данной модели являются: дальность действия (до 200 км), максимальная скорость 90 км/ч, длительное время полета (до 8 часов), достигающееся за счет использования аккумуляторов увеличенной емкости, и небольшая цена относительно дрона JOUAV-CW-30E. Кроме того, этот дрон возможно оснастить системами автоматического взлета, следования по заданному маршруту, возвращения и посадки, что, очевидно, снизит трудовые ресурсы со стороны персонала, обслуживающего предлагаемую систему [10].

Базовые пункты управления будут располагаться на участковых станциях. Обслуживание дронов и предполетную подготовку целесообразно выполнять на участковых станциях, и лишь

Таблица 2. Сравнительная таблица характеристик FPV-дронов для мониторинга железнодорожной инфраструктуры

Параметр	JOUAV-CW-30E	ZALA 421-16E5G	Wingtra One GEN II
Тип конструкции	Винтокрыл	Самолетный тип	Самолетный тип
Взлет/посадка	Вертикальный	Вертикальный	Вертикальный
Продолжительность полета	6 ч	8 ч	1 ч
Дальность полета	150 км	200 км	60 км
Максимальный взлетный вес	30 кг	10,5 кг	3,3 кг
Устойчивость к ветру	20 м/с	20 м/с	12 м/с
Темп. диапазон	От –35 до 50 °С	От –30 до 40 °С	От 0 до 40 °С
Стоимость	10 млн руб.	6 млн руб.	4 млн руб.

в исключительных случаях, когда протяженность существующего участка превышает полетный ресурс дрона, следует вводить новое разделение для участков облета дронов. В каждом пункте будет размещаться необходимое оборудование: сам дрон, комплект запасных батарей, зарядные устройства и пост управления. Такая структура позволит обеспечить непрерывный мониторинг всей железнодорожной инфраструктуры. Кроме того, благодаря возможности автономной работы аппарат может выполнять поставленные задачи без постоянного контроля оператора, а в случае возникновения угрозы переходить в режим ручного управления [10].

Рабочий цикл дрона будет организован следующим образом. После подготовки к вылету, включающей проверку технического состояния и установку свежей батареи, аппарат автоматически взлетает и следует по заданному маршруту. В процессе полета происходит сбор и передача данных на наземный пункт управления. По завершении миссии дрон автоматически возвращается на базовый пункт управления. Система зарядки и обслуживания построена по принципу многокомплектности: пока один дрон находится в полете, происходит параллельная зарядка нескольких резервных батарей. Предусмотрена автоматизированная система замены аккумуляторов и наличие резервных комплектов на случай непредвиденных ситуаций. На каждом базовом пункте управления создается полноцен-

ная инфраструктура: устанавливаются системы навигации и позиционирования, организуются каналы связи для передачи данных, монтируется серверное оборудование. Персонал осуществляет контроль работы системы и техническое обслуживание. Кроме того, передача видеосигнала с дрона возможна и в кабину машиниста. Для ночного режима наблюдения необходимо оснащение дронов тепловизорами. Кроме того, тоннели и территорию под мостами и путепроводами дроны никак не смогут патрулировать, поэтому там необходимо будет установить стационарные камеры, которые так же, как и FPV-дроны, будут передавать изображение на тот же удаленный сервер, оснащенный ИИ.

Для предотвращения столкновений с объектами в воздухе и падений все аппараты в обязательном порядке должны будут быть оснащены системами обнаружения и избегания препятствий, включающими оптические и ультразвуковые датчики. Также можно предусмотреть парашютные системы в случае потери управляемости. Вопрос защиты частной жизни граждан решается путем автоматического размывания участков видео, попадающих в частные владения. Данный режим можно реализовать с помощью искусственного интеллекта. Весь видеопоток с дрона на сервер будет передаваться в зашифрованном виде, а доступ к архивам будет строго ограничен.

Для визуального обозначения FPV-дронов в целях безопасной эксплуатации и идентифи-

кации предлагается на каждом аппарате нанести четкую и хорошо читаемую маркировку с логотипом ОАО «РЖД» и уникальным регистрационным номером, внесенным в государственный реестр. Также необходимо обязательное оснащение яркими несъемными огнями, что позволяет визуально идентифицировать аппарат. Немаловажной является часть широкой разъяснительной работы, цель которой будет заключаться в информировании сотрудников и населения близлежащих районов о полетах.

Экономическая эффективность проекта обеспечивается длительным временем автономной работы дронов и минимальным обслуживанием в процессе эксплуатации. Предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций позволяет устранить их на начальной стадии, благодаря чему получается избежать многократно более высоких затрат на ликвидацию последствий, простоев движения, экологические штрафы и страховые выплаты пострадавшим. Кроме того, при одновременном повышении уровня безопасности пассажирских и грузовых перевозок по железной дороге существенно снижаются затраты на персонал.

Варианты патрулирования

Для детального обзора оптимальная высота составит $h = 500$ м, а скорость — $v = 60$ км/ч = 1000 м/мин. При горизонтальном угле обзора камеры $\alpha = 79^\circ$ радиус обзора составит $R = h \operatorname{tg} \alpha = 2500$ м, а в обе стороны — $2R = 5000$ м. Далее рассмотрим несколько вариантов исполнения предлагаемой технологии.

В максимальном варианте предлагаемой технологии выдвигается идея абсолютно полного непрерывного мониторинга всей железнодорожной инфраструктуры. Планируется запускать дроны в обе стороны на расстоянии их обзора, то есть на дистанцию $2R$. Тогда для покрытия одной стороны потребуется следующее количество дронов:

$$n = \frac{L}{2R}, \quad (1)$$

где L — длина рассматриваемого участка.

Временной интервал попутного следования дронов составит:

$$t = \frac{2R}{v}, \quad (2)$$

где $v = 1000$ м/мин — скорость движения дронов.

Рассмотрим участок от станции А до станции Б, длина которого $L = 200$ км. Тогда в одну сторону потребуется дронов $n = 40$ шт., двигаться они будут с интервалом $t = 5$ мин. Экипировка дронов (осмотр и замена аккумуляторов) в среднем занимает 10 минут. На станциях А и Б организовано по три пункта обслуживания дронов. На представленном графике движения дронов (рис. 4) показано полтора цикла полета дронов (полет от станции А (Б) до станции Б (А) и обратно; экипировка; полет от станции А (Б) до станции Б (А)).

На полученном графике видно, что участок от станции А до станции Б непрерывно патрулируется, слепых зон нет. Однако из-за экипировки дронов их график движения смещается на 10 мин, из-за чего возникают промежутки, во время которых железнодорожная инфраструктура остается без наблюдения. Во избежание данной проблемы необходимо вводить дополнительные два дрона с каждой стороны, в таком случае участок А — Б будет под патрулированием в течение всего времени.

Таким образом, при осуществлении максимального варианта предлагаемой технологии потребуется 84 дрона, столько же операторов, по 3 пункта обслуживания дронов на каждой станции. Однако если использовать автономный режим работы дронов, то количество операторов существенно снизится и останется лишь достаточный для перехода в ручной режим управления в случае возникновения опасности штат [10]. Тем не менее максимальный вариант предлагаемой технологии чрезвычайно дорог со стороны

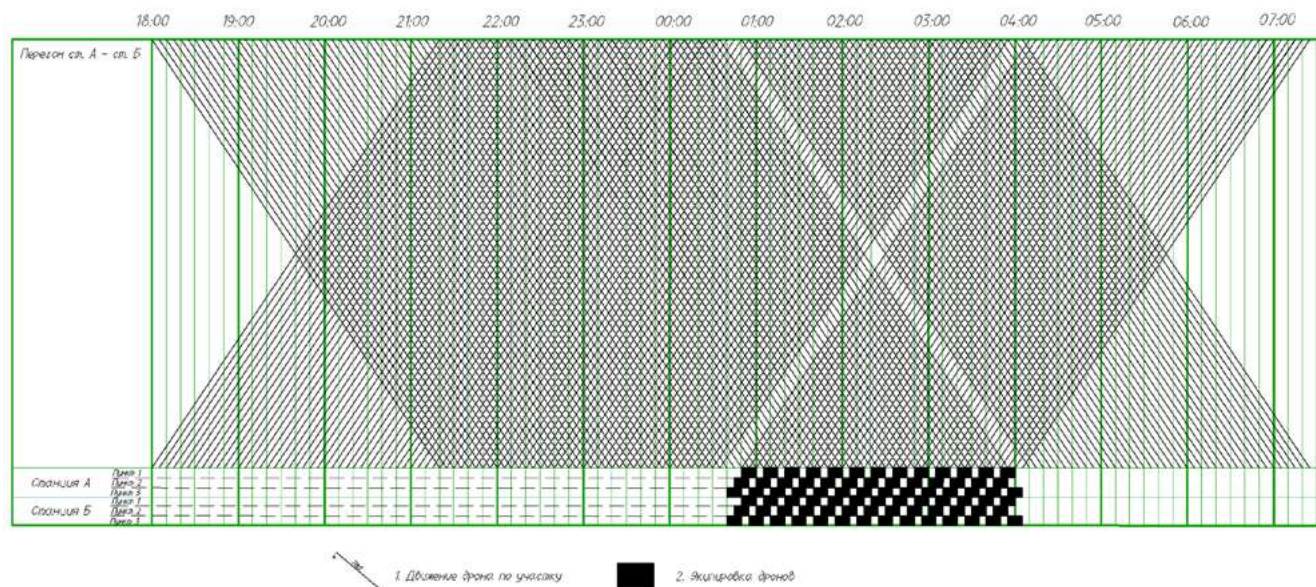


Рис. 4. График движения дронов при максимальной загрузке (выполнено авторами)

материальных и трудовых ресурсов и может быть уместен лишь в крайних случаях.

Теперь рассмотрим более реалистичный и экономически выгодный вариант предлагаемой технологии. Он заключается в интеграции графика движения дронов в систему поездной работы. Предполагается, что дрон, сканируя железнодорожное полотно и прилегающую территорию с помощью различных датчиков, будет двигаться впереди поезда на расстоянии, достаточном для того, чтобы поезд в случае возникновения опасности прибегнул к экстренному торможению и остановился. Ключевыми элементами успешной интеграции станут автоматизированный расчет безопасных интервалов между дронами и поездами, система раннего предупреждения о возможных конфликтах между дронами. Процесс внедрения данного варианта необходимо начать с пилотного проекта на отдельном участке железной дороги, где можно будет в реальных условиях проверить работоспособность системы и внести необходимые корректировки перед ее распространением на более обширные территории.

Рассмотрим участок А — 3 с двухпутным движением и участки 3 — ЗСС и ЗСС — Р

с однопутным движением. Для наглядности предлагаемого проекта для этих двух участков были составлены фрагменты графиков движения дронов с наложением на графики движения поездов (рис. 5, 6). Для снижения визуальной нагрузки время отправления и прибытия дронов не указано, но предполагается, что дроны будут вылетать за 5 минут до отправления поезда и двигаться со скоростью, равной скорости движения поезда. Тогда между поездом и дроном будет расстояние 2–3 км, что является достаточным для совершения экстренного торможения в случае возникновения опасности. Кроме того, дроны будут закреплены за локомотивами, тем самым полностью повторяя их маршрут. Такой вариант позволяет четко определять потребное количество дронов для обеспечения безопасности на выбранном участке (оно будет равно количеству локомотивов) и избавиться от излишнего патрулирования, когда фактического движения поездов на перегоне в данное время нет. В случае пакетного движения поездов возможно сокращение количества дронов до одного, летящего перед первым поездом.

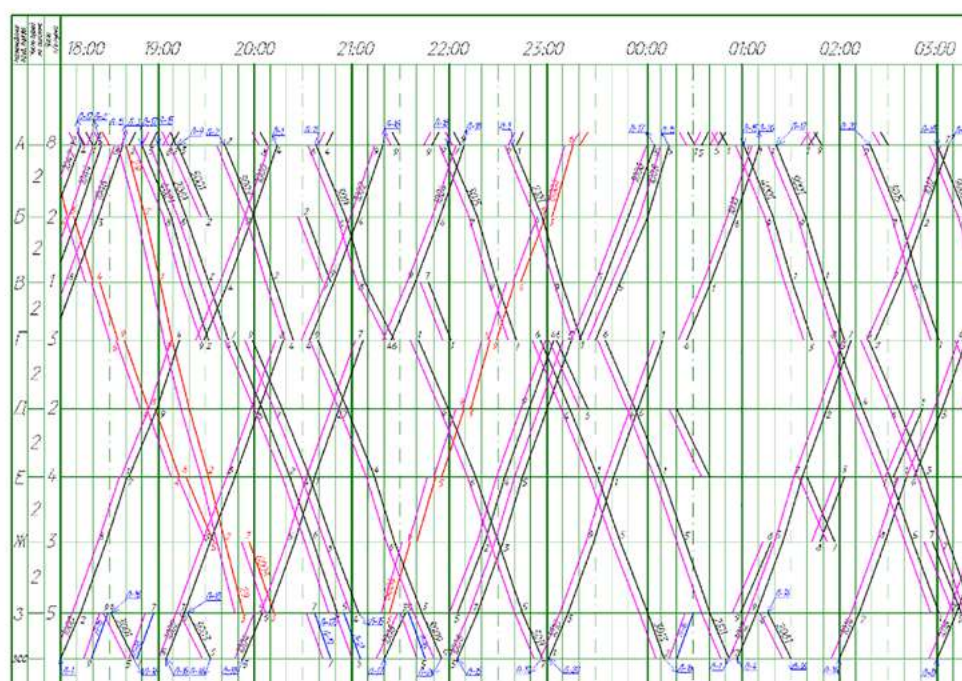


Рис. 5. Фрагмент графика движения поездов и дронов на участке А — 3 и 3 — ЗСС (выполнено авторами)

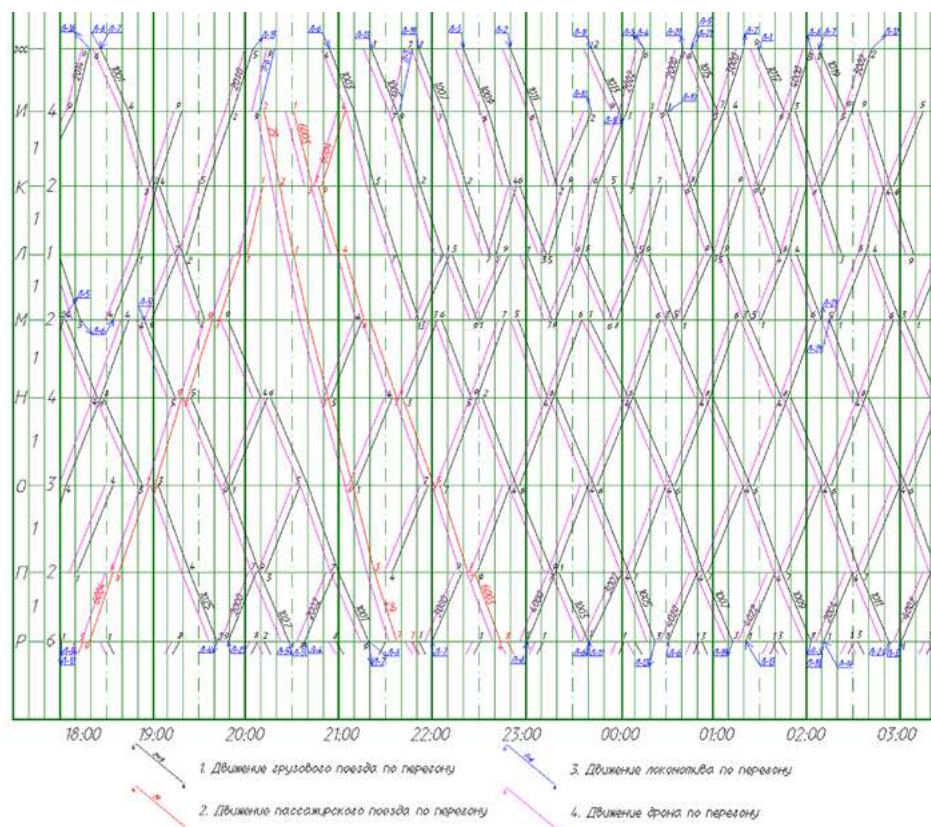


Рис. 6. Фрагмент графика движения поездов и дронов на участке ЗСС — Р (выполнено авторами)

Заключение

Представленный проект создания системы безопасности железнодорожных участков с использованием дронов ZALA 421-16E5G демонстрирует высокую эффективность и перспективность внедрения. Разработанное решение позволяет обеспечить непрерывный контроль состояния не только перегонов между станциями, но и остальной железнодорожной инфраструктуры на протяженных участках (до 200 км) с минимальными затратами человеческих ресурсов.

Ключевым преимуществом проекта является комплексный подход к организации мониторинга, который включает:

- автоматизацию процессов;
- использование современных технологий;
- создание эффективной инфраструктуры обслуживания.

Дроны с длительным временем полета способны охватывать значительные территории, своевременно выявляя потенциальные угрозы и обеспечивая оперативное реагирование на них. Предусмотрено несколько вариантов патрулирования.

Внедрение данной системы позволит достичь следующих важных результатов:

- существенное повышение уровня безопасности железнодорожных перевозок;
- сокращение времени реагирования на возникающие угрозы;
- повышение качества контроля железных дорог;
- минимизация человеческого фактора в процессе мониторинга.

Таким образом, проект создания системы безопасности железнодорожных участков на базе дронов ZALA 421-16E5G является актуальным, технически обоснованным и экономически целесообразным. Его реализация позволит значительно повысить качество контроля и обеспечить безопасность железнодорожных перевозок на современном уровне.

Список источников

1. Зинин М. С. Безопасность пассажиров на железнодорожном транспорте / М. С. Зинин // Наука и практика в медицине: сборник материалов VI Всероссийского образовательного форума (Благовещенск, 24–26 апреля 2024 года). — Благовещенск: Амурская государственная медицинская академия, 2024. — С. 166–169.
2. Галицкий В. П. Криминальная проницаемость государственной границы и территории в механизме гибридной войны Запада и России. Проблемы противодействия / В. П. Галицкий, М. П. Киреев, Н. Д. Литвинов, Д. А. Родионов // Юридическая наука: история и современность. — 2023. — № 1. — С. 52–87. —
3. Железнодорожный транспорт: энциклопедия / гл. ред. Н. С. Конарев. — М.: Большая российская энциклопедия, 1994. — 559 с.
4. Иванов А. Л. FPV-дроны / А. Л. Иванов, В. Ю. Морозов, А. А. Соловьев, Р. Ю. Сухарев // Флагман науки. — 2024. — № 10(21). — С. 256–258. — DOI: 10.37539/2949-1991.2024.21.10.003.
5. Несмиянова И. О. Возможности применения FPV-дронов в деятельности органов внутренних дел Российской Федерации / И. О. Несмиянова, Д. С. Гольцев // Судебная экспертиза и исследования. — 2024. — № 1. — С. 40–43.
6. Ивашевский М. Р. Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте / М. Р. Ивашевский // Мир транспорта. — 2019. — Т. 17. — № 5(84). — С. 298–314. — DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-5-298-314. — EDN NSTKCT.
7. Офицеров А. И. Использование искусственного интеллекта в системах обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта / А. И. Офицеров, Д. А. Сафонов // Экономика. Информатика. — 2023. — Т. 50. — № 1. — С. 203–210. — DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-1-203-210.
8. Медведев Д. А. Особенности применения видеокамер с искусственным интеллектом / Д. А. Медведев, К. В. Трифонова // Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 8-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых:

в 4 т. (Курск, 20–21 марта 2025 года). — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. — С. 185–187.

9. Калинин В. С. Искусственный интеллект и стратегическое принятие решений / В. С. Калинин, В. Б. Литовченко // Молодежь и XXI век — 2025: сборник научных статей 14-й Международной молодежной научной конференции: в 5 т. (Курск, 20–21 февраля 2025 года). — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. — С. 190–194.

10. Самосватов В. Д. Контроль текущего состояния железнодорожных путей и перспективы развития методов выявления дефектов / В. Д. Самосватов, Р. Х. Альмухаметов // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития: материалы международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Оренбург, 21–22 апреля 2022 года) / Самарский государственный университет путей сообщения, Оренбургский институт путей сообще-

ния. — Оренбург: Оренбургский институт путей сообщения — филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения», 2022. — С. 143–145.

Дата поступления: 20.09.2025

Решение о публикации: 23.10.2025

Контактная информация:

ПОПОВ Алексей Тимофеевич — канд. техн. наук, доц.;
a.t.popov1955@gmail.com

СУСЛОВА Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, доц.;
suslova_2003@mail.ru

ЧЕХОВ Матвей Александрович — студент;
matv.cheh@yandex.ru

МАЛАХОВ Алексей Иванович — канд. техн. наук, доц.;
op.lipetsk@gmail.com

Integrated Railway Safety System Using FPV Drones

A. T. Popov, O. A. Suslova, M. A. Chekhov, A. I. Malakhov

Lipetsk State Technical University, 30, Moskovskaya str., Lipetsk, 398055, Russian Federation

For citation: Popov A. T., Suslova O. A., Chekhov M. A., Malakhov A. I. Integrated Railway Safety System using FPV Drones // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1106–1118. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1106-1118

Summary

Purpose: To create a robust security management system for railway transport infrastructure, facilitating continuous surveillance over extensive railway stretches. **Methods:** The use of innovative unmanned technologies, such as automated flight control and data processing systems. The proposed concept involves segmenting the railway network into sections measuring 100–200 kilometers, with the establishment of central control points at various stations. The video feed from FPV drones will be sent to a distant artificial intelligence server, which will assess the threat level of any incidents that are detected. Based upon this assessment, the AI will either make autonomous decisions or generate a list of recommendations to be transmitted to railway personnel. This paper outlines the phases for implementing the proposed technology, outlines an operational algorithm for the security system using FPV drones, and explores various patrol strategies, each specifying the drones' movement patterns. The regulatory framework, potential risks, economic feasibility and methods for identifying UAVs by both the public and railway personnel have been comprehensively addressed. **The scientific novelty:** The integration of contemporary unmanned technologies into existing railway transport infrastructure, enabling the establishment of an effective and economically viable security system is of key importance.

The proposed system can serve as a foundation for further development of UAV-based technologies for monitoring the condition of railway tracks. **Results:** Implementation of this system is expected to substantially enhance railway safety, reduce response times to emerging threats, improve the quality of operational oversight, and minimize the impact of the human factors on monitoring processes. **Practical significance:** The implementation of a security system using FPV drones in railway transport holds significant practical importance. It is particularly relevant in areas with heightened terrorist threats, in inaccessible locations, during emergencies for search and rescue operations and for evaluating the aftermath of accidents or disasters. Furthermore, it is beneficial for the real-time monitoring of track repair activities.

Keywords: Safety in railway transport, border regions, emergencies in railway transport, terrorism, FPV drone, artificial intelligence, automatic decision-making, drone autonomous operation system, drone duty cycle, multicomplexity, patrol strategies.

References

1. Zinin M. S. Bezopasnost' passazhirov na zheleznodorozhnom transporte [Passenger safety in railway transport]. *Nauka i praktika v meditsine: sbornik materialov VI Vserossiyskogo obrazovatel'nogo foruma (Blagoveshchensk, 24–26 aprelya 2024 goda)* [Science and practice in medicine: collection of materials of the VI All-Russian educational forum] (Blagoveshchensk, April 24–26, 2024). Blagoveshchensk: Amurskaya gosudarstvennaya meditsinskaya akademiya Publ., 2024, pp. 166–169. (In Russian)
2. Galitskiy V. P., Kireev M. P., Litvinov N. D., Rodionov D. A. Kriminal'naya pronitsaemost' gosudarstvennoy granitsy i territorii v mekhanizme gibridnoy voyny Zapada i Rossii. Problemy protivodeystviya [Criminal permeability of the state border and territory in the mechanism of hybrid war between the West and Russia. Problems of counteraction]. *Yuridicheskaya nauka: istoriya i sovremennost'* [Legal science: history and modernity]. 2023, Iss. 1, pp. 52–87. (In Russian)
3. *Zheleznodorozhnyy transport: entsiklopediya* [Railway transport: encyclopedia]. Ed. by N. S. Konarev. Moscow: Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya Publ., 1994, 559 p. (In Russian)
4. Ivanov A. L., Morozov V. Yu., Solov'ev A. A., Sukharev R. Yu. FPV-drony [FPV drones]. *Flagman nauki* [Flagship of science]. 2024, Iss. 10(21), pp. 256–258. DOI: 10.37539/2949-1991.2024.21.10.003. (In Russian)
5. Nesmiyanova I. O., Gol'tsev D. S. Vozmozhnosti primeneniya FPV dronov v deyatelnosti organov vnutrennikh del Rossiyskoy Federatsii [Possibilities of using FPV drones in the activities of internal affairs bodies of the Russian Federation]. *Sudebnaya ekspertiza i issledovaniya* [Forensic examination and research]. 2024, Iss. 1, pp. 40–43. (In Russian)
6. Ivashevskiy M. R. Sistemy videonablyudeniya na zheleznodorozhnom transporte [Video surveillance systems in railway transport]. *Mir transporta* [World of transport]. 2019, vol. 17, Iss. 5(84), pp. 298–314. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-5-298-314. (In Russian)
7. Ofitserov A. I., Safonov D. A. Ispol'zovanie iskusstvennogo intellekta v sistemakh obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti okhranyaemogo ob'ekta [Using artificial intelligence in systems for ensuring integrated security of a protected object]. *Ekonomika. Informatika* [Economics. Informatics]. 2023, vol. 50, Iss. 1, pp. 203–210. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-1-203-210. (In Russian)
8. Medvedev D. A., Trifonova K. V. Osobennosti primeneniya videokamer s iskusstvennym intellektom [Features of using video cameras with artificial intelligence]. *Molodezh' i nauka: shag k uspekhu: sbornik nauchnykh statey 8-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh: v 4 t. (Kursk, 20–21 marta 2025 goda)* [Youth and science: a step towards success: collection of scientific articles of the 8th All-Russian scientific conference of promising developments by young scientists (Kursk, March 20–21, 2025): in 4 vols]. Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga" Publ., 2025, pp. 185–187. (In Russian)
9. Kalinkin V. S., Litovchenko V. B. Iskusstvennyy intellekt i strategicheskoe prinyatie resheniy [Artificial intelligence and strategic decision-making]. *Molodezh' i XXI*

vek — 2025: sbornik nauchnykh statey 14-y Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii: v 5 t. (Kursk, 20–21 fevralya 2025 goda) [Youth and the 21st century — 2025: collection of scientific articles of the 14th International youth scientific conference (Kursk, February 20–21, 2025): in 5 vols]. Kursk: ZAO “Universitetskaya kniga” Publ., 2025, pp. 190–194. (In Russian)

10. Samosvatov V. D., Al'mukhametov R. Kh. Kontrol' tekushchego sostoyaniya zheleznodorozhnykh putey i perspektivy razvitiya metodov vyyavleniya defektov [Monitoring the current state of railway tracks and prospects for developing methods of detecting defects]. *Molodezhnaya nauka v XXI veke: traditsii, innovatsii, vektory razvitiya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-issledovatel'skoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (Orenburg, 21–22 aprelya 2022 goda)* [Youth science in the 21st century: traditions, innovations, development vectors: materials of the international research conference of young scientists, postgraduates and students (Orenburg, April 21–22, 2022)]. Samarskiy

gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, Orenburgskiy institut putey soobshcheniya. Orenburg: Orenburgskiy institut putey soobshcheniya — filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya “Samarskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya” Publ., 2022, pp. 143–145. (In Russian)

Received: September 20, 2025

Accepted: October 23, 2025

Author's information:

Alexey T. POPOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; a.t.popov1955@gmail.com

Olga A. SUSLOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; suslova_2003@mail.ru

Matvey A. CHEKHOV — Student; matv.cheh@yandex.ru

Alexey I. MALAKHOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; op.lipetsk@gmail.com