

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 23, выпуск 3, 2026

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
«Медиа-Сервис» по договору № ЭА87426
от 12.01.2026

Адрес учредителя и редакции

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,
тел.: (812) 314-92-32; e-mail: izvestia@pgups.ru

Адрес издателя

111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ
Лефортово, ул. Авиамоторная, 50, стр. 2, помещ. 29/2

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 Агентством
ООО «УРАЛ-ПРЕСС ОКРУГ». Индекс подписки: 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

Курилкин Дмитрий Николаевич, заместитель
главного редактора, д-р техн. наук, доцент, 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, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Багери Мортеза, профессор, Иранский университет
науки и технологий, 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, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

Парамонов Владимир Николаевич, д-р техн. наук,
доцент, 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 транспорт-
ный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

Смирнов Владимир Игоревич, д-р техн. наук,
доцент, 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, доцент,
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 транспорт-
ный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

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

Шевлюгин Максим Валерьевич, д-р техн. наук,
доцент, 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 17.09.2026. Выход в свет: 30.09.2026

Формат 60х84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 37.2.

Тираж 200 экз. Заказ 2761/1. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «Типографский комплекс «Девиз»,
190020, Санкт-Петербург, вн. тер. г. МО Екатерингофский, наб. Обвод-
ного канала, 138, к. 1, литера В, пом. 4-Н-6-часть, ком. 311-часть.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2026

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 23, issue 3, 2026

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University

Publisher

Media Service LLC under contract № ЭА87426, 12.01.2026

Founder's address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32, e-mail: izvestia@pgups.ru

Publisher's and editorial address

111024, Moscow, ext. ter. Lefortovo municipal district,
Aviamotornaya str., 50, p. 2, room. 29/2

Mass media registration certificate number

ПИ 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 by the Agency "URAL-PRESS
OKRUG LLC". Index Direct Mail: 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, D. Eng. Sci.,
Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Evstaf'ev, 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 Ledyaev, 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

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 Solov'eva, 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, 2026.

СОДЕРЖАНИЕ



ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

О. С. Валинский, В. В. Шаповалов, А. А. Воробьев, П. Н. Щербак, И. А. Колодяжный, Н. К. Мигулин

Результаты моделирования сцепления колеса локомотива с рельсом при термометаллоплакировании тяговой поверхности колеса.....537

А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов

Развитие конструкций ходовой части пассажирских электровозов переменного тока: ВЛ60П/К; Sr1; ЭП1 (М, П).....548

А. С. Космодамианский, И. И. Лакин

Устойчивость автоматизированной системы управления техническим состоянием высокоскоростных электропоездов.....561

Р. О. Рядчиков, В. С. Кузьмин, Н. О. Жухин, А. И. Швойн

Экспериментальная оценка параметров электромагнитной помехи от асинхронного тягового привода в канале связи автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене.....572

Ю. И. Макаров, К. Ф. Исламов

Анализ возможности использования нефтяных асфальтитов в производстве углеродных волокон для модификации дорожных покрытий.....587

А. Н. Марикин, А. М. Евстафьев, В. Г. Жемчугов, А. Д. Онофрийчук

Исследование особенностей нейроуправления асинхронным двигателем с обучением в цифровом двойнике.....596

Т. Л. Риполь-Сарагоси, Д. А. Мальцев

Оценка влияния факторов воздействия на срок службы алюмогелей, применяемых в технологических схемах осушки сжатого воздуха пневмосистем подвижного состава локомотивов.....604

В. А. Анисимов, М. А. Рубцов

Совершенствование методов автоматизированного трассирования железных дорог на основе применения визуальной аналитики.....614

К. А. Московских, П. Ю. Иванов, И. А. Кудьяров, Е. Ю. Дульский

Совершенствование системы автоматического смазывания гребней колесных пар с учетом условий эксплуатации локомотива.....625

С. В. Кротов

Термомеханический анализ напряженно-деформированного состояния многослойных прессовых соединений моторно-осевых подшипников локомотивов.....635

О. В. Сенин

О применении методов статистического анализа при определении времени следования локомотивных бригад пассажиром.....649

А. В. Качалкин, А. Ф. Колос

Стендовые испытания полномасштабных моделей балластной призмы железнодорожного пути при различной степени загрязнения щебня угольной пылью.....656

Д. С. Аскендерова, А. В. Новичихин

Теоретико-игровая модель стейкхолдеров перевозочного процесса.....668

И. Р. Терехова, В. Н. Ушацкий, Е. А. Манько

Особенности оказания услуг помощи и сопровождения маломобильным гражданам на транспортных объектах, в том числе без предварительной заявки, в рамках решения задач по обеспечению безопасной и доступной среды.....681

А. В. Колесова, С. А. Гулин, С. Л. Колесов

Анализ отказов тяговых электродвигателей скоростных электропоездов проектов «Ласточка» и «Финист».....694

**ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ****Е. И. Макарова, И. С. Тимофеев, Вэйцзе Ло**

Очистка поверхностей от эксплуатационных загрязнений в рамках технического обслуживания подвижного состава.....707

К. В. Сливец, В. Н. Парамонов

Вариант представления поверхности нагружения и возможные ее формы в условиях двумерной задачи.....717

А. В. Мартыненко

Прогнозирование суточных изменений пассажиропотоков в агломерации крупного города на основе данных сотовых операторов.....727

Д. М. Рябых, С. В. Ключев, А. В. Ключев, Н. А. Слободчикова

Модифицированные композиты на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений.....743

В. Н. Кавказский

Численное моделирование влияния деформаций плит перронного покрытия, обусловленных проходкой тоннелей, на коэффициент динамичности при воздействии AIRBUS A380-800.....754

В. В. Веселов

Комбинированная конструкция большепролетного здания.....764

Д. С. Рабцевич, Н. Б. Марков, Д. А. Букарев

Методика расчета параметров устройств для перемешивания активного ила в зонах биоблока очистных сооружений высокой производительности.....776

Ю. Г. Барабанщиков, А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков, Ю. А. Филонов, А. Л. Новиков, Е. Г. Козин

Математическое обоснование промерзания обделки шахтного ствола.....789

Д. А. Черепанова

Влияние погрешности оценки качества бетона на надежность зданий и сооружений и эффективность использования потенциала бетона.....801

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ****П. А. Харченко, Н. В. Гребенников**

Разработка компьютерной имитационной модели пассажирского поезда для исследования тягово-энергетических процессов на основе средств регистрации параметров движения.....816

А. С. Жевак, Д. Н. Курилкин

Математическое моделирование термической устойчивости постоянных магнитов в условиях внешнего размагничивающего воздействия применительно к тяговому подвижному составу.....830

В. П. Бирюков, Я. А. Горюнов

Получение износостойких покрытий при лазерной наплавке порошком на основе железа с добавлением наночастиц карбида тантала.....842

CONTENTS



PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

O. S. Valinskij, V. V. Shapovalov, A. A. Vorob'ev, P. N. Shcherbak, I. A. Kolodyazhnyj, N. K. Migulin Simulation Results of Locomotive Wheel — Rail Adhesion During Thermometal Cladding of the Wheel Tread Surface.....	537
A. A. Andryushchenko, A. A. Zarifyan, Yu. A. Orlov Development of Chassis Design for AC Passenger Electric Locomotives: VI60P/K; Sr1; EP1(M, P).....	548
A. S. Kosmodamiansky, I. I. Lakin The Automated Control System Stability for the High-speed Electric Trains Technical Condition.....	561
R. O. Ryadchikov, V. S. Kuz'min, N. O. Zhuxin, A. I. Shvojn Experimental Assessment of the Parameters of Electromagnetic Interference from an Asynchronous Traction Drive in the Communication Channel of Automatic Cab Signaling in the Metro System.....	572
Yu. I. Makarov, K. F. Islamov Analysis of the Possibility of Using Petroleum Asphaltites in the Production of Carbon Fibers for Modification of Road Surfaces.....	587
A. N. Marikin, A. M. Evstaf'ev, V. G. Zhemchugov, A. D. Onofrijchuk Study of Direct Neural Control of an Induction Motor Trained in a Digital Twin.....	596
T. L. Ripol'-Saragosi, D. A. Mal'tsev Assessment of the Influence of Impact Factors on the Service Life of Aluminum Gels Used in Technological Schemes for Drying Compressed Air in Pneumatic Systems of Locomotive Rolling Stock.....	604
V. A. Anisimov, M. A. Rubtsov Improving Methods of Computer-Aided Design of Railway Routes Based on the Use of Visual Analytics.....	614
K. A. Moskovskikh, P. Yu. Ivanov, I. A. Kud'yarov, E. Yu. Dul'skij Improvement of the Automatic Wheel Flange Lubrication System with Consideration of Locomotive Operating Conditions.....	625
S. V. Krotov Thermomechanical Analysis of the Stress-Strain State of Multilayer Press Joints of Motor-Axial Bearings of Locomotives.....	635
O. V. Senin On the Use of Statistical Analysis Methods in Determining the Travel Time of Locomotive Crews.....	649
A. V. Kachalkin, A. F. Kolos Large-Scale Box Tests of Ballast Layer with Varying Degrees of Coal Dust Contamination of Crushed Stone.....	656
D. S. Askenderova, A. V. Novichikhin A Game-Theoretic Model of Stakeholders in the Transportation Process.....	668
I. R. Terekhova, V. N. Ushatskij, E. A. Man'ko Specifics of Providing Assistance and Support Services to People with Limited Mobility on Transport Facilities, including without Prior Request, as Part of Solving the Problems of Ensuring a Safe and Accessible Environment.....	681
A. V. Kolesova, S. A. Gulin, S. L. Kolesov Analysis of Traction Motor Failures of High-Speed Electric Trains of the "Lastochka" and "Finist" Projects.....	694



GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

E. I. Makarova, I. S. Timofeev, Weijie Luo

Cleaning of Surfaces from Operational Contamination as Part of the Maintenance of Rolling Stock.....707

K. V. Slivetz, V. N. Paramonov

Possible Representation of the Yield Surface and Its Possible Shapes in a Two-Dimensional Problem.....717

A. V. Martynenko

Forecasting Daily Changes in Passenger Flows in a Large Urban Agglomeration Based on Mobile Operator Data.....727

D. M. Ryabykh, S. V. Klyuev, A. V. Klyuev, N. A. Slobodchikova

Modified Composites Based on the Use of Ash and Slag Mixtures and Carbide Sludge for the Construction of Earthworks.....743

V. N. Kavkazskij

Numerical Modeling of Dynamic Load of Airbus A380-800 on Apron Pavement and Justification of Dynamic Coefficient.....754

V. V. Veselov

Combined Design of a Long-Span Building.....764

D. S. Rabtsevich, N. B. Markov, D. A. Bukarev

The Method of Calculating the Parameters of Activated Sludge Mixing Devices in the Bioblock Areas of High-Performance Wastewater Treatment Plants.....776

Yu. G. Barabanshchikov, A. A. Sokornov, A. N. Kon'kov, A. L. Novikov, Yu. A. Filonov, E. G. Kozin

Mathematical Justification of the Mine Shaft Lining Freezing.....789

D. A. Cherepanova

The Impact of Errors in Concrete Quality Assessment on the Reliability of Buildings and Structures and the Efficiency of Utilizing Concrete's Potential.....801



HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

P. A. Kharchenko, N. V. Grebennikov

Development of a Computer Simulation Model of a Passenger Train for Studying Traction and Energy Processes Based on Motion Parameter Recording Systems.....816

A. S. Zhevak, D. N. Kurilkin

Mathematical Modeling of the Thermal Stability of Permanent Magnets under External Demagnetizing Fields for Traction Rolling Stock.....830

V. P. Biryukov, Ya. A. Goryunov

Production of Wear-Resistant Coatings by Laser Cladding with Fe-Based Powder with the Addition of Ta Carbide Nanoparticles.....842



УДК 629.4.027.4

Результаты моделирования сцепления колеса локомотива с рельсом при термометаллоплакировании тяговой поверхности колеса

О. С. Валинский¹, В. В. Шаповалов², А. А. Воробьев¹, П. Н. Щербак²,
И. А. Колодяжный², Н. К. Мигулин¹

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

² Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Валинский О. С., Шаповалов В. В., Воробьев А. А., Щербак П. Н., Колодяжный И. А., Мигулин Н. К. Результаты моделирования сцепления колеса локомотива с рельсом при термометаллоплакировании тяговой поверхности колеса // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 537–547. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-537-547

Аннотация

Цель: исследование и обоснование эффективности термометаллоплакирования тяговой поверхности бандажа колеса локомотива для повышения тягового усилия и снижения износа в системе «колесо — рельс». **Методы:** применено физическое моделирование механической системы привода локомотива и верхнего строения пути с обеспечением динамического подобия натурным объектам. Равенство кинетической и потенциальной энергии подсистем до и после приведения обеспечило идентичность частот и форм собственных колебаний. В качестве критерия достоверности воспроизведения фрикционных процессов принято соответствие вида изнашивания на модели характеру изнашивания натурального контакта колеса и рельса. Разработанная структура модели допускает решение имитационных задач динамически нагруженных транспортных систем методами математического моделирования. Также рассмотрен контактно-ротапринтный способ термоплакирования (лубликации) рельсов. **Результаты:** стендовые испытания термометаллоплакирования тяговой поверхности бандажа локомотива показали рост тягового усилия и значительное снижение интенсивности изнашивания элементов фрикционной пары. **Практическая значимость:** предложенные технологические решения по термометаллоплакированию и термоплакированию рабочих поверхностей позволяют повысить износостойкость гребней колесных пар и головок рельсов в кривых участках пути, а также увеличить реализуемое тяговое усилие локомотива, что в совокупности обеспечивает снижение эксплуатационных затрат и повышение безопасности движения.

Ключевые слова: термометаллоплакирование контакта «колесо — рельс», контактно-ротапринтное термоплакирование, физико-математическое моделирование, катковый стенд, стендовые испытания

Введение

Рельс — основной и наиболее дорогой элемент верхнего строения пути, поэтому увеличение продолжительности его жизненного цикла остается острой проблемой ОАО «РЖД». Функциональное предназначение рельса реализуется в динамически нагруженной системе взаимодействия «колесо — рельс», в которой тяговая поверхность катания колеса образует с рельсом открытую фрикционную пару трения сцепления, а контакт гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса служит для удержания подвижного состава в пределах рельсовой колеи. Реализуемые в контакте открытые фрикционные поверхности трения в зависимости от условий не всегда выполняют свое функциональное назначение в оптимальном режиме контактирования, что в итоге приводит к активному износу как гребней колес, так и боковой поверхности головки рельса и непроизводительным потерям тяговой мощности локомотива. Вся сложность в том, что данные пары трения, кардинально различные по функциональности, должны обладать столь же различными фрикционными свойствами. Общим для них является только то, что контакт металлических поверхностей в условиях значительных динамических нагрузок и скоростей скольжения должен иметь минимально возможную интенсивность изнашивания.

Анализ научно-исследовательских работ по проблеме взаимодействия в системе «колесо — рельс» показывает, что процессами сцепления по тяговой поверхности и в контакте гребня с рельсом можно управлять, добиваясь как повышения величины и стабильности тягового усилия локомотивов, так и снижения сверхнормативного износа боковой поверхности головки рельса и гребней колес [1–3].

Методы

Управление данными процессами имеет принципиальную возможность, а не реально достижимую простыми инженерными решениями цель. Наиболее проработанным вариантом является снижение сверхнормативного бокового износа, и связано это с тем, что данная проблема с конца прошлого века превратилась в «раковую опухоль» железных дорог всех технически развитых железнодорожных держав [4]. Наиболее продуктивным решением признано использование систем лубрикации.

Боковой износ гребней колес и боковой поверхности головки рельса — процесс естественный, как контакт двух металлических поверхностей в открытой поверхности трения в условиях довольно больших нагрузок при интенсивном проскальзывании, но он не должен быть существенно больше расчетных величин в соответствии с теорией расчета на износ для данных пар трения, то есть более нормативных значений. В соответствии с отчетами железных дорог можно отметить, что проблема не решена. В кривых малого радиуса при столь существенной грузонапряженности, как на участках Транссибирской магистрали, рельсы ДТ370ИК и ДТ400ИК, имеющие статус «повышенной износостойкости и контактной выносливости», служат не более одного года [2]. Износ рельсов практически соответствует износу гребней колес, что лимитирует общий ресурс колесной пары, который также ниже установленных нормативных значений.

Для повышения стабильности и величины сцепления на тяговой поверхности контакта «колесо — рельс» и снижения потерь тяговой энергии в мировой практике железных дорог используют активизаторы трения. Они способствуют изменению коэффициента трения качения в зоне контакта. Исследования в этой

области нацелены на создание в зоне контакта третьего тела — тонкого слоя на поверхностях колеса и рельса.

Теоретические основы термоплакирования и термометаллоплакирования рабочих поверхностей бандажей колесных пар локомотивов созданы на базе нескольких научных подходов. Среди них — квантово-химический анализ сил адгезии и когезии при контакте поверхностей трения системы «колесо — рельс», физико-математическое моделирование нелинейных фрикционных систем, а также трибоспектральная идентификация процессов трения и изнашивания.

Разработанная технология опирается на контактно-ротапринтные методы термоплакирования рабочих поверхностей колеса. Для этого применяют специальные материалы с заданными трибологическими показателями, которые выступают альтернативой дистанционным (форсуночным) методам внесения в зону контакта колеса локомотива с рельсом третьего тела. Такое третье тело может обладать антифрикционными свойствами (например, жидкие и пластичные смазочные материалы) или фрикционными (например, кварцевый песок).

Разработка теоретических основ термоплакирования стальных поверхностей открытых узлов трения с применением термостабильных термопластов-адгезивов со специальными функциональными присадками позволяет формировать на поверхностях трения колес третье тело в виде тонких нанослоев с анизотропными свойствами. Эти нанослои могут переноситься в процессе контактирования на рабочие поверхности рельсов.

Технология термометаллоплакирования в контакте колеса и рельса призвана управлять процессами сцепления. Это включает повышение коэффициента сцепления и обеспечение его стабильности, регулирование тягового усилия

локомотива по осям, управление поперечным креном, а также снижение вертикального износа колес и рельсов [6, 7].

Анализ проблем контакта колеса и рельса показывает, что исследования в области триботехники пока не дают полного представления о них. Существующие технологические решения зачастую базируются на аналогиях с подходами из других отраслей. При этом система «колесо — рельс» обладает специфическими особенностями, которые связаны с формированием фрикционных контактов в динамически взаимодействующих подсистемах: тяговом приводе подвижного состава и верхнем строении пути (ВСП).

Проведение исследований на реальных локомотивах и реальном ВСП связано со значительными трудностями и материальными затратами. Такие исследования оправданы лишь на итоговой стадии эксплуатационных испытаний. Отрабатывать и проверять проектные решения, а также оптимизировать значения управляющих параметров эффективнее и надежнее на физических моделях механической системы привода локомотива и верхнего строения пути. Подобные модели позволяют апробировать идеи проектных решений уже на стадиях проектирования, а также в ходе стендовых и доводочных испытаний.

Результаты

По имеющейся практике стендовых исследований и испытаний отдельные узлы подсистемы, например, тормоза, муфты, демпферы и т. д., исследуют на испытательных стендах. Однако для динамически нагруженных фрикционных механических систем подобные исследования могут создавать ложные представления о работоспособности, так как реализуются в условиях динамического нагружения, не соответствующего реальным условиям

эксплуатации. А так как механические системы моторно-рельсового транспорта являются существенно динамически нагруженными, то данные исследования подузлов и систем должны проводиться на стендах, динамически подобных натурным условиям эксплуатации.

Подобное замещение реального объекта при его исследовании для получения свойств и характеристик наиболее важных для исследователя возможно при применении физического моделирования с прогнозированием динамики процессов фрикционного взаимодействия в узлах трения. При разработке данных моделей применим «принцип оптимальной неточности»: модель должна быть настолько детализирована, насколько это необходимо для целей исследования, для которого ее создали [3].

В соответствии с подобным подходом при формировании модели реального процесса, установки или всей системы используются только наиболее важные характеристики, которые и моделируются при исключении менее значимых. Исходя из данных представлений и требований можно сформировать необходимые условия реализации модельного эксперимента для динамически нагруженных систем:

1. Динамические свойства механических систем лабораторных и стендовых установок должны быть подобны натурным. Данное условие достижимо, если механическая система испытательного стенда или лабораторной установки описывается одной математической моделью. Динамическое подобие достижимо, если совпадают их основные частоты и формы собственных колебаний.

2. Динамические свойства механических систем являются функциями времени, поэтому моделирование их реализации должно проходить в реальном временном масштабе.

Наиболее сложными при моделировании являются вопросы реализации динамическо-

го подобия модели и реальной механической системы. Связь приводной механической системы с исполнительной, как правило, реализуется через фрикционное взаимодействие (колесо — рельс, ведущая и ведомая полумуфты и т. д.), поэтому для выполнения данного требования при моделировании необходимо соблюдение условий:

- процессы реализации трения в модели и натурном образце должны быть подобны;
- модели механических подсистем должны быть подобны, так как в единую динамическую механическую систему их объединяет фрикционная подсистема.

При реализации физического моделирования, помимо динамического, как правило, обеспечиваются условия геометрического, физического и теплового подобия. Чем сложнее исследуемая система, тем большим конечным множеством моделей она может быть представлена, то есть вместо полной модели можно использовать ряд последовательных, каждая из которых описывает ее значимую для данной подсистемы характеристику. Подобное представление сложной системы при ее моделировании теоретически обосновано, так как соответствует теории Тьюринга, которая доказывает, что модель, представленная в более полной форме и по сложности соответствующая оригиналу, практически непригодна для детальных исследований.

Исследование формирования третьего тела, реализуемого в процессе термометаллоплакирования контакта «колесо — рельс», реализация которого проходит под влиянием динамических процессов со стороны силового привода и механической системы тележки подвижного состава и соответствующего отклика на данное воздействие со стороны верхнего строения пути, можно представить в виде соответствующих моделей механических подсистем и пары трения качения.

На базе теоретических основ физико-математического моделирования существенно-нелинейных фрикционных объектов [1, 5, 3] создана методика модельных испытаний мобильной системы «путь — тяговый подвижной состав». Для проведения модельной оптимизации процесса фрикционного взаимодействия колеса с рельсом и условий формирования на их поверхностях третьего тела при термометаллоплакировании создана физическая модель привода и механической системы тележки с учетом их динамических параметров. Ее многомассная эквивалентная расчетная схема после упрощения представлена на рис. 1.

В соответствии с разработанными принципами методики физико-математического

моделирования для реализации динамической совместимости процессов в механических системах и фрикционной поверхности пары трения качения «колесо — рельс» их следует представить в виде реализации двух последовательных этапов.

В динамически нагруженной фрикционной механической системе диссипативная функция трения не оказывает влияния на частоты собственных колебаний механических подсистем, изменяя только их декремент колебаний. Это дает возможность на первом этапе моделировать механические подсистемы без учета трения. Однако для того, чтобы соблюдалась динамическая совместимость процессов, при расчетах масштабных коэффициентов

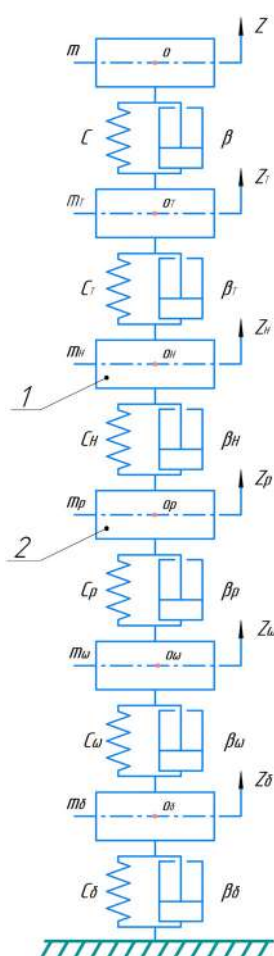


Рис. 1. Эквивалентная расчетная схема

следует учесть необходимость соблюдения равенства констант подобия частоты собственных колебаний $C_\omega = 1$ и времени $C_e = 1$.

Натурный образец и его модель следует изготавливать из одинаковых материалов, чтобы элементы механических подсистем обладали равными временами релаксации, что является необходимым условием реализации модельного эксперимента в реальном масштабе времени.

Предварительно проведенные исследования на машине трения показали, что при использовании технологии термометаллоплакирования на поверхности роликов реализуется процесс модификации поверхности. При этом увеличиваются величина и стабильность коэффициента трения качения, что положительно сказывается на процессе реализации тягового усилия локомотива. Поэтому при исследовании в расчетную модель механических подсистем привода и верхнего строения пути следует включить фрикционную модель поверхности контакта колеса и рельса.

Возможность данной реализации решена на втором этапе составления физической модели. Включение в механическую систему узла трения при условии соблюдения механического, теплового и динамического подобия усложняется различием их математического описания. Механические системы традиционно описываются проверенной практикой системой дифференциальных уравнений движения, анализ которых является основой составления их физических моделей. В то время как узлы трения ввиду их существенной нелинейности подобного математического описания не имеют. Их линеаризация, как правило, приводит к реализации больших погрешностей, поэтому введение в физическое описание механических систем параметров, наиболее существенно влияющих на формирование процессов трения — сцепления, не представляется возможным.

Решение данной проблемы возможно, если воспользоваться принципом суперпозиции, то есть при моделировании узла трения качения использовать проверенный практикой метод анализа размерностей с ограничениями [4, 5], при этом в его краевые условия ввести те соотношения параметров, которые были получены для реализации динамической совместимости механических подсистем с узлом трения.

Критерием достоверности процессов трения на физической модели узла трения является реализация на модели вида изнашивания, характерного для процессов сцепления натуральных колеса и рельса. Данное условие возможно, если при моделировании на поверхностях контакта обеспечить равенство констант подобия удельной нагрузки и времени контакта единице, то есть $C_q = 1$ и $C_t = 1$, что достигается введением параметра удельной нагрузки в число базисных параметров при реализации метода анализа размерностей.

Упрощенная эквивалентная расчетная схема строится на основе равенства кинетической и потенциальной энергии подсистем до и после приведения. Это обеспечивает динамическое подобие при моделировании: частоты и формы собственных колебаний реальных механических систем — привода и тележки локомотива, а также верхнего строения пути — остаются идентичными.

При создании этой расчетной схемы используется ряд допущений:

- Сосредоточенные массы механической системы подвижного состава — кузов, элементы тележки, колесные пары — рассматриваются как абсолютно жесткие тела, обладающие массой m_i .
- ВСП моделируется в виде идеальной балки на упругом основании постоянного поперечного сечения по всей длине.

Демпфирование колебаний в вертикальной плоскости обеспечивается за счет рессорного подвешивания. При этом возможные деформации рессорного подвешивания в горизонтальной плоскости не учитываются.

Основной источник динамических возмущений по обеим рельсовым нитям при качении колеса по рельсу (90–99 % воздействия) — непрерывные неровности пути в вертикальной плоскости μ_z . Влияние групповых и одиночных неровностей на колесо пренебрежимо мало из-за их незначительного количества.

Если рассматривать движение масс кузова, элементов тележки и неподрессоренной части (колесной пары) по вертикальным неровностям рельсового пути — при условии, что неровности на обеих рельсовых нитях одинаковы ($\eta_1 = \eta_1^1$; $\eta_2 = \eta_2^1$), — то все колеса тележки совершают одинаковые перемещения. Это позволяет упростить эквивалентную расчетную схему до модели движения одного колеса.

В расчетной схеме приняты следующие обозначения: m — приведенная масса кузова; m_t — масса тележки; m_n — масса колесной пары (необдрессоренная часть тележки); m_p — приведенная масса рельса; $m_{ш}$ — приведенная масса шпалы; m_b — приведенная масса балласта; θ , θ_t , θ_k , θ_p , $\theta_{ш}$, θ_b — соответственно центры масс корпуса, тележки, колеса, рельса, шпалы и балласта.

Тяговый состав конструктивно имеет две тележки (для одной секции), поэтому масса кузова, а также величины жесткостей и демпфирования, в том числе центрального подвешивания, распределяются между ними равномерно. В зависимости от вида подвижного состава и, соответственно, количества колес η_i в тележке локомотива величины надрессорных и неподрессоренных частей тележки, величины жесткостей и демпфирования будут в η_i раз меньше.

Структура полученной модели, помимо воспроизведения на стенде, позволяет исполь-

зовать ее для решения имитационных задач поведения динамически нагруженных транспортных механических систем при математическом моделировании.

Исследование формирования сил трения сцепления по тяговой поверхности колеса и рельса в условиях динамического воздействия формирующих его механических подсистем тягового привода, тележки и верхнего строения пути позволяет значительно повысить достоверность данных исследований. Полученная упрощенная эквивалентная расчетная схема с ее инерционными, жесткостными и демпфирующими характеристиками в целом воспроизводится на испытательном катковом стенде, представленном на рис. 2 и 3.

Обсуждение

В качестве исходного материала для термометаллоплакирования была использована смесь мягких металлов с прочной и высокой адгезией к высокопрочным стальным поверхностям.

Увеличение ресурса исследуемой фрикционной системы «колесо — рельс» обеспечивается износом сформированного в процессе термометаллоплакирования тонкого слоя рабочего тела на тяговой поверхности колеса при его постоянном восстановлении. Реализация процесса термометаллоплакирования представлена на рис. 4.

При этом поверхность колеса подвергается процессу микрошлифования, которое сопровождается минимальным износом, интенсивность которого на порядок ниже номинального уровня. В свою очередь, увеличение тягового усилия реализуется за счет значительного увеличения величины фактической площади контакта поверхности колеса и рельса (в 4–5 раз) и незначительного снижения твердости или предельного напряжения на сжатие (в 2–3 раза) материала рабочего тела. Так,

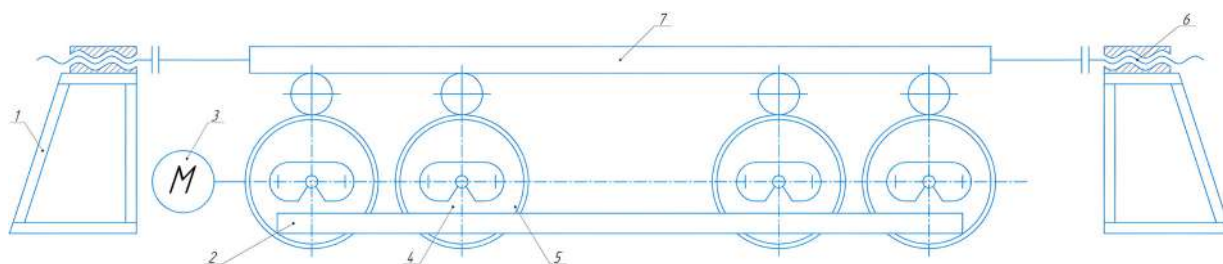
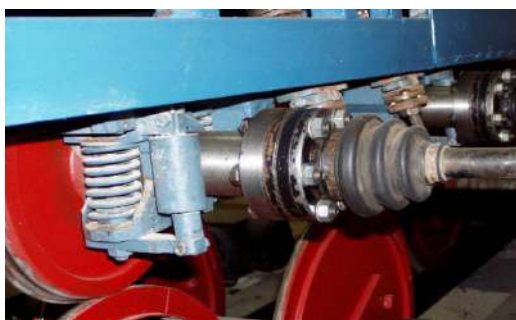


Рис. 2. Схема каткового стенда: 1 — консоли; 2 — рама стенда; 3 — привод катков; 4 — опоры катков; 5 — конические редукторы; 6 — регулировочные винты; 7 — модель экипажа



а



б

Рис. 3. Конструкция стенда: *а* — привод катков, моделирующих колесные пары локомотива; *б* — карданная передача привода катков



а



б

Рис. 4. Реализация процесса термометаллоплакирования:
а — поверхность колеса до металлоплакирования; *б* — поверхность колеса после термометаллоплакирования смесью мягких металлов

величина твердости материала третьего тела на тяговой поверхности колеса снижается до уровня 90–100 НВ. Данное снижение твердости компенсируется увеличением величины ФПК, что позволяет обеспечить увеличение силы тяги на 30%.

Проведенные на катковом стенде испытания показали, что термометаллоплакирование тяговой поверхности бандажа локомотива обеспечивает значительное повышение тягового усилия и существенное снижение интенсивности изнашивания элементов фрикционной

системы «тяговая поверхность бандажа колеса — рельс».

В процессе оптимизации технологического оборудования контактно-ротапиринтного термоплакирования разработана конструкция, которая для эксплуатируемого парка локомотивов является рабочим органом гребнерельсосмазывания (лубрикации рельсов). Данное решение позволяет со временем отказаться от применения дорогостоящих специализированного подвижного состава и вагонов-рельсосмазывателей, а также исключить применение низкоэффективных стационарных систем лубрикации.

Список источников

1. Моделирование мобильных фрикционных систем: учебник / В. В. Шаповалов [и др.]; под ред. В. В. Шаповалова. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. 1147 с.
2. Мурга Л. Е., Луговский А. Ю., Богданов О. К. О результатах наблюдений за боковым износом рельсов ДТ350 и ДТ400ИК // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 6. С. 20–24.
3. Современная трибология: итоги и перспективы / Э. Д. Браун [и др.]; отв. ред. акад. РАН К. В. Фролов; Российская академия наук, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова. М.: URSS ЛКИ, 2008. 476 с.
4. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо — рельс» / В. В. Шаповалов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78. № 3. С. 177–182.
5. Физико-математическое моделирование нелинейных фрикционных систем / В. В. Шаповалов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технические науки. 2014. № 6. С. 77–82.
6. Харламов П. В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на по-

верхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 12. С. 556–560.

7. Модельная оптимизация технологии контактно-ротапиринтного плакирования поверхностей трения / В. В. Шаповалов [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 1. С. 84.

8. Лубрикация рельсов и воздействие на путь подвижного состава / В. С. Косов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. № 7. С. 48–51.

9. Упруго-диссипативные характеристики тяжело-нагруженных модифицированных пар трения / С. Л. Чернышев [и др.] // Трение и износ. 2023. Т. 44, № 1. С. 58–67. DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67.

10. Improving the Energy Efficiency of Power Transmissions of a Rolling Stock on the Basis of Dynamic Anisotropy of Frictional Contact / V. Shapovalov [et al.] // E3S Web of International Conference “Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems (EEESTS-2019)”. 2019. Vol. 104. Art. no. 01002. DOI 10.1051/e3sconf/201910401002

Дата поступления: 03.07.2026

Решение о публикации: 13.08.2026

Контактная информация:

ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — кандидат техн. наук, профессор; nttk@pgups.ru

ШАПОВАЛОВ Владимир Владимирович — доктор техн. наук, профессор; spn55@mail.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — доктор техн. наук, профессор; 79219751198@yandex.ru

ЩЕРБАК Петр Николаевич — доктор техн. наук, профессор; spn55@mail.ru

КОЛОДЯЖНЫЙ Илья Алексеевич — аспирант; spn55@mail.ru

МИГУЛИН Никита Константинович — аспирант; nttk@pgups.ru

Simulation Results of Locomotive Wheel — Rail Adhesion During Thermometal Cladding of the Wheel Tread Surface

O. S. Valinskij¹, V. V. Shapovalov², A. A. Vorob'ev¹, P. N. Shcherbak²,
I. A. Kolodyazhnyj², N. K. Migulin¹

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

² Rostov State University of Railway Transport, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: Valinskij O. S., Shapovalov V. V., Vorob'ev A. A., Shcherbak P. N., Kolodyazhnyj I. A., Migulin N. K. Simulation Results of Locomotive Wheel — Rail Adhesion During Thermometal Cladding of the Wheel Tread Surface // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 537–547. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-537-547 (In Russian)

Abstract

Objective: investigation and substantiation of the effectiveness of thermometal cladding of the locomotive wheel tread surface to increase tractive effort and reduce wear in the wheel — rail system. **Methods:** physical modeling of the locomotive drive mechanical system and the permanent way was applied, ensuring dynamic similarity to full-scale objects; the equality of kinetic and potential energy of subsystems before and after reduction ensured the identity of natural frequencies and mode shapes. The correspondence of the wear type on the model to the wear pattern of the full-scale wheel — rail contact was adopted as the validity criterion for reproducing friction processes. The developed model structure allows solving simulation tasks of dynamically loaded transport mechanical systems using mathematical modeling methods. The contact rotary-printing method of rail thermocladding (lubrication) is also considered. **Results:** bench tests of thermometal cladding of the locomotive wheel tread demonstrated an increase in tractive effort and a significant reduction in the wear rate of friction pair elements. **Practical importance:** the proposed technological solutions for thermometal cladding and thermocladding of working surfaces allow increasing the wear resistance of wheel flanges and rail heads in curved track sections, as well as increasing the achievable tractive effort of the locomotive, which together ensures a reduction in operating costs and an improvement in traffic safety.

Keywords: thermometal cladding of wheel — rail contact, contact rotary-printing thermocladding, physical and mathematical modeling, roller test rig; bench tests

References

1. Shapovalov V. V., et al., ed. by V. V. Shapovalov. Modelirovanie mobil'nykh friktsionnykh sistem: uchebnik [Modeling of Mobile Friction Systems: A Textbook], Moscow, Federal State Budgetary Institution of Additional Professional Education “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”, 2020, 1147 p. (In Russian)
2. Murga L. E., Lugovskiy A. Yu., Bogdanov O. K. O rezul'tatakh nablyudeniy za bokovym iznosom rel'sov DT350 i DT400IK [On the Results of Observations

of Lateral Wear of Rails DT350 and DT400IK], *Put' i putevye khozyaystvo [Track and Track Facilities]*, 2023, no. 6, pp. 20–24. (In Russian)

3. Braun E. D., et al. Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy [Modern Tribology: Results and Prospects], Russian Academy of Sciences, A. A. Blagovinnov Institute of Machine Science, Moscow, URSS LKI, 2008, 476 p. (In Russian)

4. Shapovalov V. V., et al. Povyshenie effektivnosti friktsionnoy sistemy “koleso — rel's” [Improving the Efficiency of the “Wheel — Rail” Friction

System], *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport]*, 2019, vol. 78, no. 3, pp. 177–182. (In Russian)

5. Shapovalov V. V., et al. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie nelineynykh friktsionnykh sistem [Physical and Mathematical Modeling of Nonlinear Friction Systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Higher Educational Institutions. Technical Sciences]*, 2014, no. 6, pp. 77–82. (In Russian)

6. Kharlamov P. V. Issledovanie obrazovaniya vtorichnykh struktur friktsionnogo perenosa na poverkhnosti stal'nykh obraztsov pri realizatsii tekhnologii metalloplakirovaniya [Study of the Formation of Secondary Structures of Frictional Transfer on the Surface of Steel Samples during the Implementation of Metal-Plating Technology], *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making]*, 2021, no. 12, pp. 556–560. (In Russian)

7. Shapovalov V. V., et al. Model'naya optimizatsiya tekhnologii kontaktno-rotaprintnogo plakirovaniya poverkhnostey treniya [Model Optimization of the Technology for Contact-Rotaprint Cladding of Friction Surfaces], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Universities. North Caucasian Region. Technical Sciences]*, 2018, no. 1, p. 84. (In Russian)

8. Kosov V. S., et al. Lubrikatsiya rel'sov i vozdeystvie na put' podvizhnogo sostava [Rail Lubrication and the Impact of Rolling Stock on the Track],

Zheleznodorozhnyy transport [Railway Transport], 2022, no. 7, pp. 48–51. (In Russian)

9. Chernyshev S. L., et al. Uprugo-dissipativnye kharakteristiki tyazhelo-nagruzhennykh modifitsirovannykh par treniya [Elastic-Dissipative Characteristics of Heavily Loaded Modified Friction Pairs], *Trenie i iznos [Friction and Wear]*, 2023, vol. 44, no. 1, pp. 58–67. DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67 (In Russian)

10. Shapovalov V., et al. Improving the Energy Efficiency of Power Transmissions of a Rolling Stock on the Basis of Dynamic Anisotropy of Frictional Contact, *E3S Web of Conferences: International Conference “Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems (EEESTS-2019)”*, 2019, vol. 104, art. no. 01002. DOI 10.1051/e3sconf/201910401002

Received: July 03, 2026

Accepted: August 13, 2026

Author's information:

Oleg S. VALINSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Vladimir V. SHAPOVALOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Aleksandr A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering; 79219751198@yandex.ru

Petr N. SHCHERBAK — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Il'ya A. KOLODYAZHNYJ — Graduate Student; ntk@pgups.ru

Nikita K. MIGULIN — Graduate Student; ntk@pgups.ru

УДК 629.423.1-82.2:629.4.02

Развитие конструкций ходовой части пассажирских электровозов переменного тока: ВЛ60П/К; Sr1; ЭП1(М, П)

А. А. Андриященко¹, А. А. Зарифьян², Ю. А. Орлов¹

¹ ООО «ТМХ Инжиниринг», Россия, 115054, Москва, Озерковская наб., 54, стр. 1

² ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2

Для цитирования: Андриященко А. А., Зарифьян А. А., Орлов Ю. А. Развитие конструкций ходовой части пассажирских электровозов переменного тока: ВЛ60П/К; Sr1; ЭП1(М, П) // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 548–560. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-548-560

Аннотация

Цель: выполнить аналитическое обобщение развития конструкций ходовой части пассажирских электровозов переменного тока ВЛ60П/К, Sr1 и ЭП1(М, П), оснащенных коллекторными тяговыми двигателями, и показать преемственность технических решений от первых отечественных машин к более современным локомотивам. **Методы:** использован сравнительный историко-технический анализ, опирающийся как на эксплуатационную документацию, так и на личный опыт авторов. Рассмотрены основные узлы механической части: кузов, тележки, связи кузова с тележками, буксовое и кузовное подвешивание, механический тяговый привод, тяговые редукторы и колесные пары. Сопоставление выполнено по осевым формулам, способам передачи тяговых и тормозных сил, типам подвешивания тяговых двигателей и конструкционным скоростям. **Результаты:** установлено, что развитие ходовой части шло от электровоза ВЛ60П/К с трехосными тележками, шкворневой передачей продольных сил, листовыми рессорами и тяговым приводом первого класса к решениям, реализованным на Sr1 и ЭП1(М, П): двухосным тележкам, наклонным тягам, люлечному подвешиванию, винтовым пружинам с гидравлическими демпферами и тяговому приводу второго класса. Показана роль электровоза Sr1 как промежуточного этапа, на котором были отработаны решения, впоследствии использованные на отечественных пассажирских электровозах. Обобщены изменения конструкции колесных пар, редукторов и связей кузова с тележками. Итогом стали повышение конструкционной скорости со 110 до 140–160 км/ч и улучшение динамических качеств локомотивов. Сформирован единый ряд признаков, позволяющий проследить отказ от решений, ограничивавших скорость и увеличивавших неподрессоренные массы, в пользу более совершенных схем передачи нагрузок. **Практическая значимость:** материалы статьи могут использоваться при анализе эволюции отечественного электровозостроения за последние 70 лет, выборе направлений модернизации ходовой части, подготовке учебных курсов и формировании требований к перспективным пассажирским электровозам колеи 1520 мм. Также она задает основу для последующего сопоставления с электровозами ЭП10 и ЭП20 с асинхронным тяговым приводом.

Ключевые слова: пассажирские электровозы переменного тока, ходовая часть, кузов, тележки, кузовное подвешивание, буксовое рессорное подвешивание, механический тяговый привод, зубчатый тяговый редуктор, колесные пары

Введение

70 лет назад, в феврале 1956 года, было принято правительственное постановление [1], которое положило начало переходу железных дорог нашей страны на электрическую тягу. Основным предприятием, где было начато массовое производство электровозов, стал Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ), в настоящее время входящий в состав АО «Трансмашхолдинг». Разработкой проектной документации занималось конструкторское бюро НЭВЗа, а затем Всесоюзный (ныне Всероссийский) научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения (ВЭЛНИИ) в сотрудничестве со многими другими организациями, отраслевыми НИИ и вузами.

В 1962 году было начато производство пассажирских электровозов переменного тока ВЛ60П/К. Затем, поскольку в силу политики интеграции в рамках СЭВ наше Министерство путей сообщения закупало пассажирские электровозы по импорту в Чехословакии, последовала многолетняя пауза. Однако в этот период времени по контракту с железными дорогами Финляндии был спроектирован и выпускался односекционный четырехосный электровоз переменного тока Sr1 на скорость 160 км/ч. Благодаря этому были разработаны технические решения, которые позднее нашли применение в конструкции пассажирских электровозов для РЖД. После 1991 года заказы на грузовые электровозы практически прекратились, но возник не терпящий отлагательства вопрос о создании отечественного пассажирского электровоза на замену импортным. Поочередно были спроектированы и освоены в производстве пассажирские электровозы переменного тока ВЛ65, ЭП1 и затем его модификации М и П.

В 2002 году Министерство путей сообщения приняло документ [2], в основу которого

положен принцип специализации локомотивов по видам пассажирских и грузовых сообщений. Кроме того, по экипажной части на пассажирских и скоростных электровозах предусматривалось применение двухступенчатого рессорного подвешивания и механического тягового привода с опорно-рамным подвешиванием тяговых двигателей и редукторов. В сотрудничестве с зарубежными фирмами были спроектированы, построены и переданы в эксплуатацию пассажирские электровозы ЭП10 и ЭП20 «Олимп». Эти локомотивы являются двухсистемными (имеют возможность питания как от сети переменного тока 25 кВ, 50 Гц, так и от сети постоянного тока 3 кВ) и оснащены, в отличие от всех электровозов прежних лет выпуска, асинхронным тяговым приводом.

В настоящее время действует государственный стандарт [3], который распространяется на электровозы, предназначенные для грузовых и пассажирских перевозок по железнодорожным путям общего пользования с шириной колеи 1520 мм, и определяет общие технические требования к электровозам в целом, их системам и составным частям. В частности, для пассажирских электровозов рекомендуемая конструкционная скорость установлена не менее 160 км/ч.

Целью настоящей статьи является аналитическое рассмотрение основных тенденций развития конструкций ходовой части пассажирских электровозов переменного тока ВЛ60П/К, Sr1 и ЭП1(М, П), имеющих коллекторные тяговые двигатели.

Электровоз ВЛ60П/К (пассажирский, выпрямительная установка на диодах)

Односекционный электровоз ВЛ60 [4, 5] имеет осевую формулу 3о-3о. Конструкция его экипажной части значительно отличалась от принятой на ранее выпускаемых электровозах.

Здесь необходимо отметить влияние конструктивных решений, примененных на электровагонах серии Ф [6, 7].

Электровагон ВЛ60 получил следующие технические решения по экипажной части:

- установка автосцепок на раме кузова;
- опирание кузова на рамы тележек при помощи центральных и боковых опор;
- трехосные несочлененные тележки, имеющие разбег средней оси, со шкворневой системой передачи тяговых и тормозных сил на раму кузова;
- буксовое рессорное подвешивание, состоящее из листовых рессор, балансиров и винтовых пружин;
- бесчелюстные двухповодковые буксы с подшипниками качения;
- механический тяговый привод I класса (опорно-осевое подвешивание тягового двигателя и редуктора);
- моторно-осевые подшипники скольжения;
- тяговая зубчатая передача типа «разнесенный шеврон»;
- колесные пары с коробчатыми колесными центрами, диаметр колеса по кругу катания — 1250 мм.

Мощность тяговых электродвигателей НБ410, НБ412, НБ415 составляет 647–800 кВт в часовом режиме и 550–675 кВт в длительном.

Различие между грузовым и пассажирским вариантами электровагона заключается в передаточном отношении тяговой зубчатой передачи, благодаря чему удалось поднять максимальную скорость со 100 до 110 км/ч:

1) $i = 88 : 23 = 3,826$ — для грузового ВЛ60К;

2) $i = 82 : 30 = 2,733$ — для пассажирского ВЛ60П/К.

За 1962–1965 годы был выпущен 301 электровагон пассажирской серии. После ВЛ60 односекционные электровагоны с осевой формулой 3о-3о больше не выпускались. Затем началось

производство грузовых электровагонов ВЛ80 с осевой формулой 2 (2о-2о), где были применены некоторые технические решения его предшественника. Однако пассажирской версии электровагон ВЛ80 не получил.

Электровагон Sr1 (грузопассажирский для железных дорог Финляндии, выпрямительная установка на тиристорах)

Разработка проекта электровагона переменного тока Sr1 силами ВЭЛНИИ и НЭВЗ началась по техническим требованиям Управления Финских железных дорог в 1970 году [6, 8]. Поставки электровагонов в Финляндию были начаты с 1973 года и продолжались по 1993 год включительно.

Электровагон Sr1 представляет собой односекционный локомотив, кузов которого опирается на две двухосные тележки (осевая формула 2о-2о). В ходе проектных работ реализованы многие передовые технические решения, которые в дальнейшем были перенесены на пассажирские электровагоны для отечественных железных дорог. Так, впервые было применено плавное бесконтактное тиристорное регулирование напряжения.

При проектировании электровагона Sr1 с требуемой нагрузкой на ось 21 т была принята несущая конструкция кузова охватывающего типа. Разработана новая кабина, ее длина увеличена на 300 мм против применявшейся в то время для электровагонов МПС. Кузов опирается на две двухосные несочлененные тележки. Для передачи вертикальных нагрузок от кузова на тележки, а также поперечных сил между ними было принято люлечное подвешивание. Для гашения вертикальных и боковых колебаний кузова электровагона установлены гидравлические демпферы. В сочетании с опорно-рамной подвеской тяговых двигателей это обеспечило

высокие ходовые качества электровоза и минимальное его воздействие на путь при движении во время испытаний со скоростью вплоть до 180 км/ч [8].

По системе продольной связи с кузовом тележки локомотивов подразделяются на шкворневые (устаревшая конструкция) и бесшкворневые (при помощи наклонных тяг). Тяговые и тормозные силы от рамы тележки электровоза Sr1 к кузову передаются через две наклонные тяги (рис. 1). Отметим, что наклонные тяги впервые были применены именно на электровозе Sr1, впоследствии на ВЛ85, ВЛ65, а также ЭП1 и других современных локомотивах. Установлены по две тяги на тележку, которые работают поочередно только на растяжение или только на сжатие в зависимости от направления движения электровоза. В последующем система была переработана и упрощена: вместо двух тяг на тележку была установлена одна, работающая и на сжатие, и на растяжение. В системе имеется упругий элемент, который позволяет более мягко передавать силы тяги и торможения от рамы тележки к раме кузова.

Электровоз Sr1, как и все электровозы переменного тока, имеет бесчелюстные тележки с поводковыми буксами. Как видно из рис. 1,

буксовая ступень рессорного подвешивания выполнена с помощью винтовых пружин, опирающихся на корпус крыльчатой буксы (листовая рессора отсутствует), с параллельно включенным гасителем колебаний.

На рис. 2 показана колесная пара электровоза Sr1 для колеи шириной 1524 мм. Диаметр колеса по кругу катания — 1250 мм. Ось сверленная (пустотелая), в дальнейшем пустотелые оси будут применяться на электровозе ЭП20. Всего было построено 112 электровозов Sr1.

Для скоростей движения 160 км/ч потребовалось применение тягового привода II класса (опорно-рамный двигатель и опорно-осевой редуктор). Тяговый электродвигатель НБ-501 (часовая мощность 820 кВт) крепится на раме тележки. Крутящий момент передается от вала электродвигателя к шестерне прямозубого редуктора через карданную передачу с крестовиной и муфтой, которая поставлялась фирмой Škoda. За счет изменения передаточного отношения опорно-осевого тягового редуктора ($i = 2,89$ либо $i = 2,5$) этот локомотив имеет два исполнения по скорости (140 либо 160 км/ч) — соответственно для вождения грузовых (массой 1500–1800 т) или пассажирских (600–900 т) поездов.

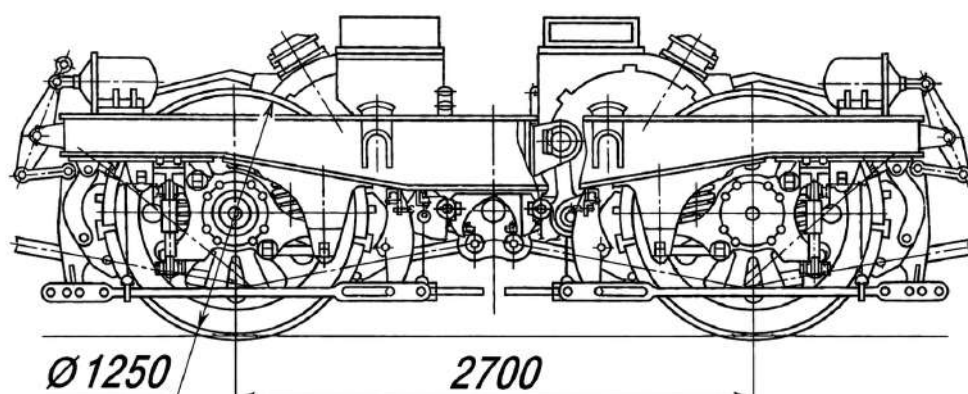


Рис. 1. Тележка электровоза Sr1 (линии действия сил отмечены штрих-пунктиром, идущим от кронштейна под рамой тележки)

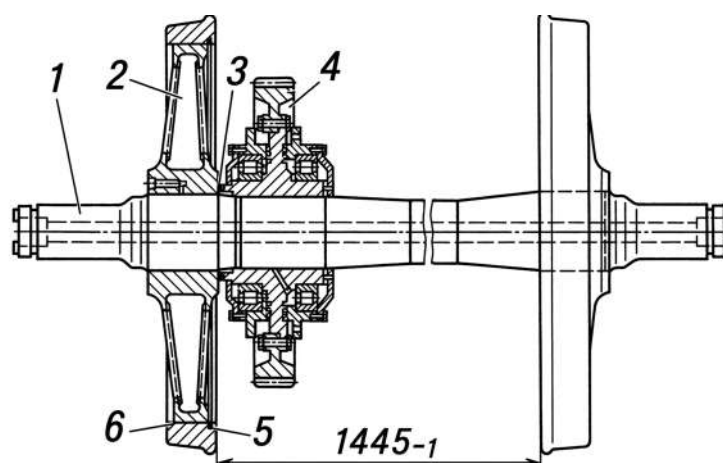


Рис. 2. Колесная пара электровоза Sr1: 1 — ось; 2 — колесный центр; 3 — уплотнительное кольцо; 4 — колесо зубчатое; 5 — кольцо бандажное; 6 — бандаж

Электровоз ЭП1 (пассажирский, выпрямительная установка на тиристорах)

В конце 1980-х — начале 1990-х годов спрос на грузовые электровозы, на производстве которых специализировался НЭВЗ, резко сократился, но возникла проблема создания пассажирского электровоза на замену импортным электровозам серии ЧС. В короткий срок на базе одной секции грузового электровоза ВЛ85 был разработан грузопассажирский электровоз типа ВЛ65 с осевой формулой 2о-2о-2о и теми же тяговыми электродвигателями НБ-514. Он имел тяговый привод I класса с передаточным отношением зубчатой передачи $81 : 28 = 2,893$ и конструкционную скорость 120 км/ч. В буксовой ступени применены только винтовые пружины с установкой гидrogасителей. Всего было изготовлено 48 машин типа ВЛ65.

Был выпущен опытный электровоз ВЛ6-016 с тяговым приводом II класса (опорно-рамный двигатель, опорно-осевой редуктор, передача тягового момента от коллекторного тягового двигателя к редуктору посредством торсионного вала с зубчатой и резинокордной муфтами).

Были установлены новые тяговые электродвигатели НБ-520В и зубчатая передача с отношением $i = 85 : 26 = 3,269$, в результате чего конструкционная скорость достигла 140 км/ч.

На базе конструкционных решений электровоза ВЛ65-016 был разработан электровоз ЭП1, выпуск которого начат с 1998 года [9, 10]. Из-за компоновочных ограничений на электровозе ЭП1 применен один преобразователь и один сглаживающий реактор на три параллельно включенных тяговых двигателя. Этот электровоз впервые был оснащен микропроцессорной системой управления и диагностики (МСУД).

В 2007 году на основе ЭП1 был создан модифицированный электровоз ЭП1М, отличающийся от базовой модели улучшенной кабиной машиниста модульной конструкции, соответствующей современным требованиям, а также ЭП1П — специально для эксплуатации на тяжелом горном профиле. Он отличается от ЭП1М повышенным передаточным числом редуктора ($i = 88 : 23 = 3,826$) для увеличения силы тяги и имеет конструкционную скорость 120 км/ч.

Механическая часть электровоза ЭП1 состоит из двухкабинного кузова и трех двухосных

тележек (рис. 3). Ударно-тяговые приборы установлены на раме кузова. Аналогичную структуру механической части получили и выпущенные в дальнейшем электровозы ЭП10 и ЭП20. Во время стоянки направленная по вертикали вниз сила веса кузова с установленным оборудованием распределяется по трем тележкам. Во время движения возникают также продольные и поперечные силовые взаимодействия. Связи кузова с тележками предназначены для передачи всех видов сил от рамы кузова к тележкам, как вертикальных, так и горизонтальных — продольных и поперечных. Ударно-тяговые приборы установлены на раме кузова.

Вертикальная и поперечная связь кузова с тележками осуществлена на крайних тележках посредством элементов люечного подвешивания и на средней тележке — комплектом упругих качающихся сжатых стержней. Продольная связь тележек с кузовом осуществлена при помощи наклонных тяг. Тележки связаны с кузовом тягами двухстороннего действия, работающими на растяжение — сжатие.

Связи кузова с тележками (крайними и средней) различны по конструкции. Связи кузова с крайними тележками (рис. 4) состоят из лю-

ечного подвешивания, упоров, наклонной тяги и установки гасителей колебаний — горизонтальных и вертикальных.

Связи кузова со средней тележкой (рис. 5) состоят из опор кузова (упругих качающихся стержней), благодаря которым тележка может перемещаться в поперечном направлении относительно кузова, тем самым становится возможным прохождение кривых; наклонной тяги и установки гасителей колебаний — вертикальных и антивилятельных. Вертикальные демпферы разнесены для более эффективного гашения колебаний галопирования и уменьшения нагрузок в наклонных тягах и тяговых передачах.

Основными составными узлами тележек являются рама, буксовое рессорное подвешивание, колесная пара с буксами и редуктором, система тормозная, гидравлические демпферы и тяговый двигатель (рис. 6).

Необходимо отметить, что буксовое рессорное подвешивание выполнено при помощи винтовых пружин и гидравлических демпферов, листовые рессоры более не применяются. На крайних тележках устанавливаются люечные подвески кузова (7), гребнесмазыватели АГС8,

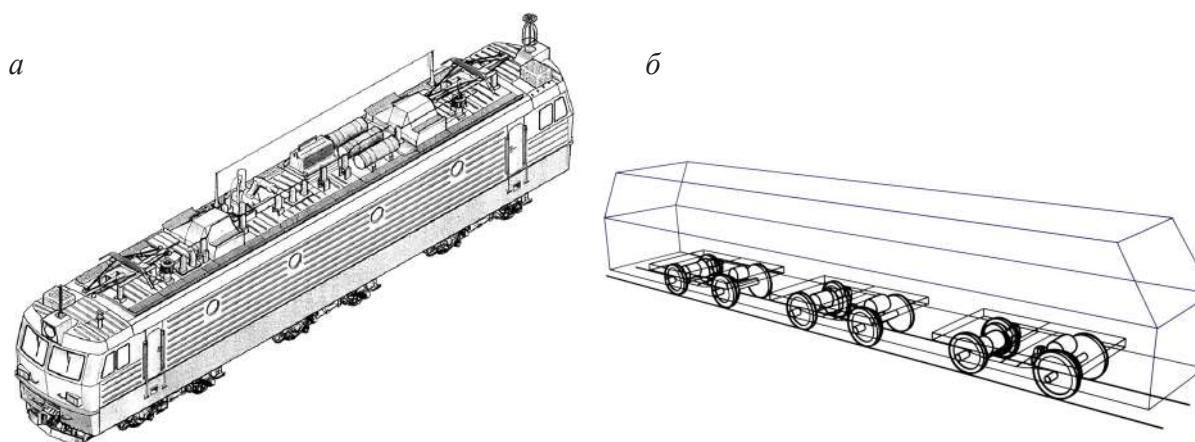


Рис. 3. Электровоз ЭП1: а — общий вид; б — структура механической части

а на одной из крайних тележек тормозная система имеет рычаги для подсоединения привода ручного тормоза. Средняя тележка отличается от крайних тем, что вместо люлечных подвесок применены опоры в виде упругих качающихся стержней, выполненных так же, как на электровозе ВЛ85.

Тяговые устройства тележек значительно упрощены по сравнению с электровозами Sr1 и ВЛ85. По существу, единственным элементом

тягового устройства является сама наклонная тяга, которая одним концом крепится к вилке на раме кузова, а другим — к кронштейну на раме тележки.

Наклонные тяги (см. рис. 4 и 5) предназначены для передачи сил тяги и торможения от тележек к кузову. Тяга представляет собой толстостенную трубу с приваренными по концам литыми головками. Одной головкой тяга крепится к вилке буферного устройства кузова,

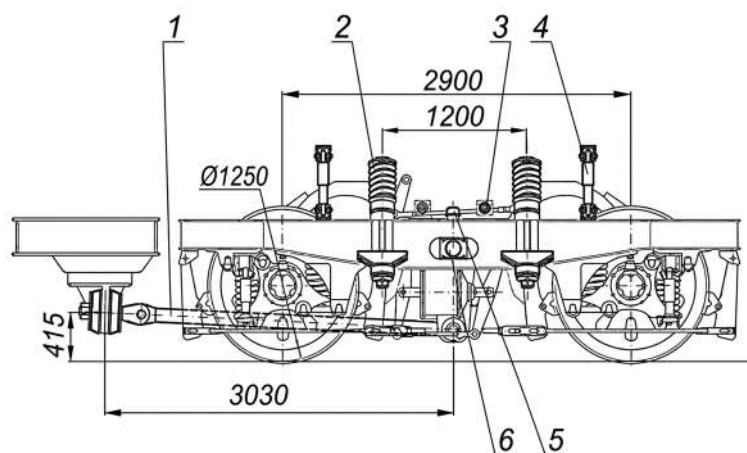


Рис. 4. Связи кузова с крайними тележками электровоза ЭП1: 1 — наклонная тяга; 2 — люлечное подвешивание; 3 — горизонтальный гидродемпфер; 4 — вертикальный гидродемпфер; 5 — вертикальный упор; 6 — горизонтальный упор

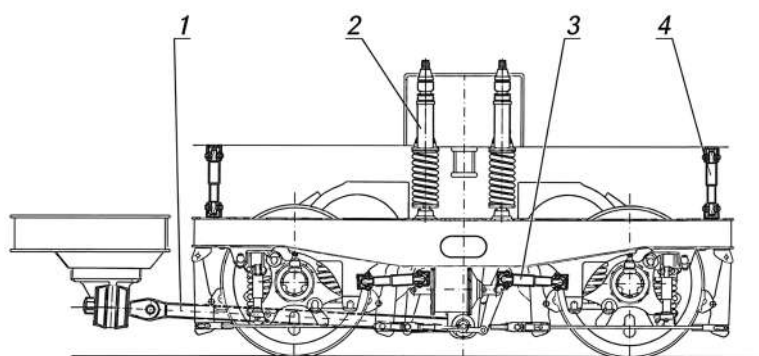


Рис. 5. Связи кузова со средней тележкой электровоза ЭП1: 1 — наклонная тяга; 2 — опора кузова; 3 — антивилятельный гидродемпфер; 4 — вертикальный гидродемпфер

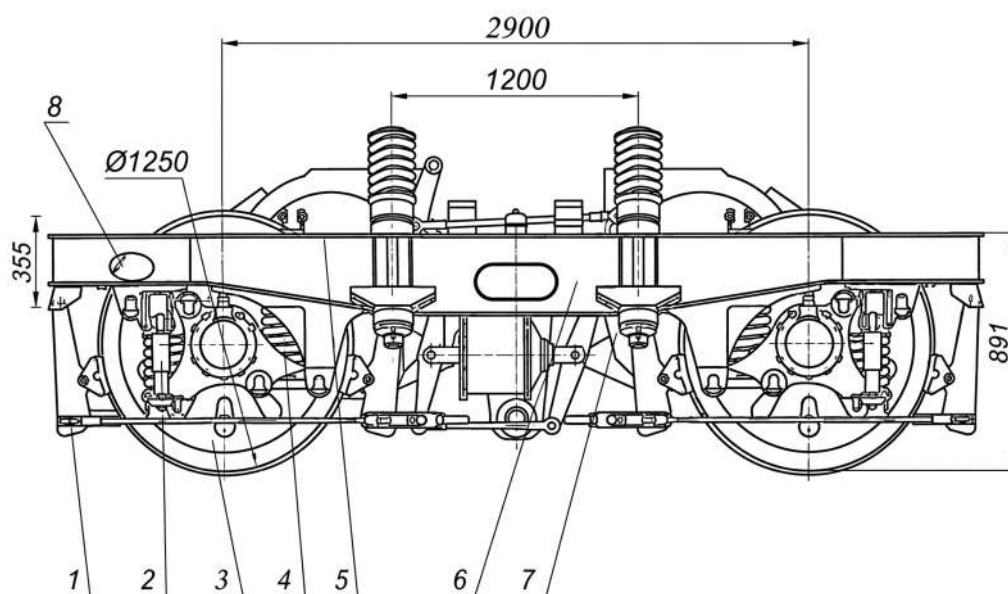


Рис. 6. Крайняя тележка электровоза ЭП1: 1 — система тормозная; 2 — гидравлический демпфер; 3 — пара колесная с буксами и редуктором; 4 — рессорное подвешивание; 5 — тяговый двигатель; 6 — рама тележки; 7 — люлечное подвешивание; 8 — система смазки гребней

другой — к кронштейну на раме тележки. Подвижность тяги в горизонтальной плоскости при отходе кузова и разворотах тележки обеспечивают шарнирные подшипники, запрессованные в головки тяги. Наклонные тяги крайней и средней тележек по длине одинаковые.

Механический тяговый привод I класса (опорно-осевая подвеска и двигателя, и редуктора) применяется на грузовых электровозах при скоростях до 110–120 км/ч. Параллельность осей вращения якоря и колесной пары обеспечивается тем, что моторно-осевые и моторно-якорные подшипники жестко установлены в корпусе тягового двигателя.

Для уменьшения динамических нагрузок, возникающих при движении на высоких скоростях, тяговый двигатель необходимо устанавливать на раме тележки. Отметим здесь работы по созданию опорно-рамного подвешивания тяговых двигателей: первым таким электровозом был опытный ВЛ81, изготовленный в 1976 году.

Следующим шагом в разработке отечественного тягового привода с опорно-рамным подвешиванием тяговых двигателей был привод электровоза ВЛ84. При его разработке, кроме опыта, полученного на электровозе ВЛ81, был использован также опыт разработки и постройки тепловоза ТЭП70. В ходе испытаний выяснилось, в частности, что преимущества рамной подвески двигателя по воздействию на путь начинают проявляться при скоростях свыше 120–140 км/ч, то есть за пределами конструкционной скорости грузовых электровозов.

При разработке тягового привода II класса для электровоза ВЛ65-016 (который впоследствии был применен на ЭП1) была принята схема, показанная на рис. 7. История появления и развития такой конструкции описана в [11, 12].

Тяговый привод (рис. 8) включает опорно-рамный двигатель типа НБ-520В, опорно-осевой редуктор и передачу тягового момента

от тягового двигателя к редуктору посредством торсионного вала с зубчатой и резинокордной муфтами (передаточный механизм).

Применена зубчатая полумуфта, которая имеет 46 бочкообразных (сферических) зубьев, нарезанных с модулем 6 мм. Торсионный вал,

изготовленный из высоколегированной стали, соединяется с зубчатой полумуфтой и ступицей резинокордной муфты коническими прессовыми соединениями.

Зубчатая передача шевронная с числом зубьев 85 : 26 (ЭП1 и ЭП1М) и 88 : 23 (ЭП1П).

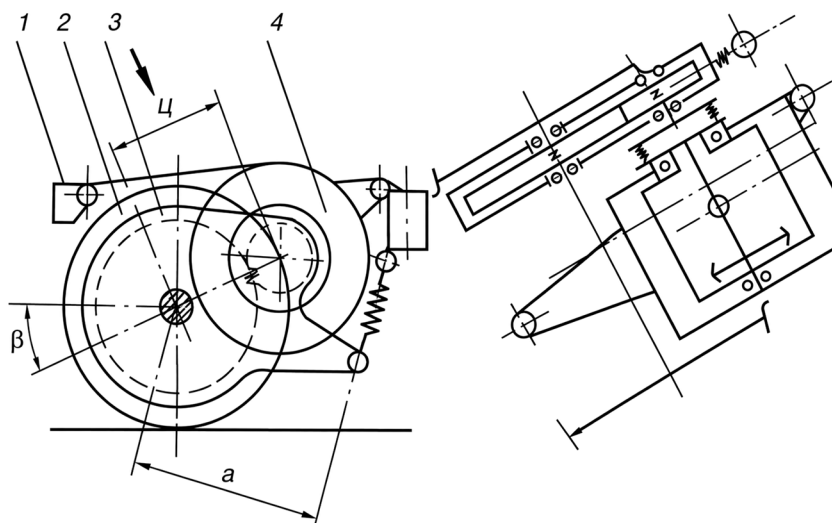


Рис. 7. Схема тягового привода II класса: 1 — рама тележки; 2 — колесная пара; 3 — тяговый редуктор; 4 — тяговый двигатель; Ц — межосевое расстояние (центральный); a — плечо подвески редуктора; β — угол наклона централи

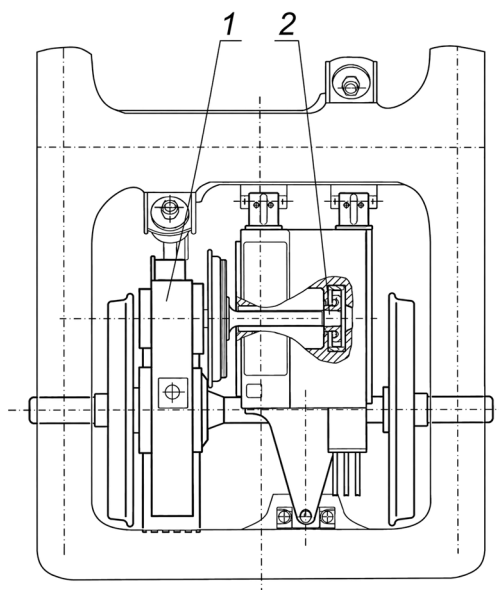


Рис. 8. Установка тягового привода на раме тележки электровоза ЭП1:
1 — редуктор тяговый с колесной парой; 2 — механизм передаточный

Модуль зуба — 10 мм, межосевое расстояние $C = 616$ мм. Тяговый электродвигатель НБ-520В мощностью 800/750 кВт в часовом или длительном режиме установлен на раме тележки.

Рессорное буксовое подвешивание электроваза ЭП1 отличается от рессорного подвешивания электроваза ВЛ85 отсутствием листовой рессоры и установкой вертикального гидрогасителя между корпусом буксы и рамой тележки. Буксы двухповодковые с роликовыми подшипниками качения.

Колесная пара электроваза ЭП1 (рис. 9) значительно отличается от унифицированной колесной пары грузовых электровазов, но по схемному решению близка к конструкции колесной пары электроваза Sr1 (см. рис. 2). Колесная пара состоит из оси с шевронным зубчатым колесом (3) и двух ходовых колес, состоящих из колесных центров (1), бандажей (2) и бандажных колец (4). Отметим, что здесь ось колесной пары сплошная, а не пустотелая, как на Sr1.

В общей сложности на момент написания статьи выпущено более 850 машин семейства

ЭП1, причем производство ЭП1М продолжается. Электроваз ЭП1 считается одной из самых удачных разработок Новочеркасского завода.

Заключение

За период с 1956 по 1998 год в нашей стране были разработаны и реализованы проекты пассажирских электровазов переменного тока ВЛ60П/К и ЭП1 (М, П), а также Sr1. Все они оснащены коллекторными тяговыми двигателями.

Электровазы ВЛ60П/К и ЭП1 (М, П) имеют кузова с мощными рамами, которые они унаследовали от своих грузовых прототипов. Кузов электроваза Sr1 был спроектирован с нуля и представляет собой несущую конструкцию охватывающего типа.

Последовательно применялись осевые формулы 3о-3о, 2о-2о и 2о-2о-2о, то есть на смену трехосным тележкам пришли двухосные. Шкворневые узлы были заменены наклонными тягами — сначала по две на тележку, а затем по одной. Применялся механический тяговый

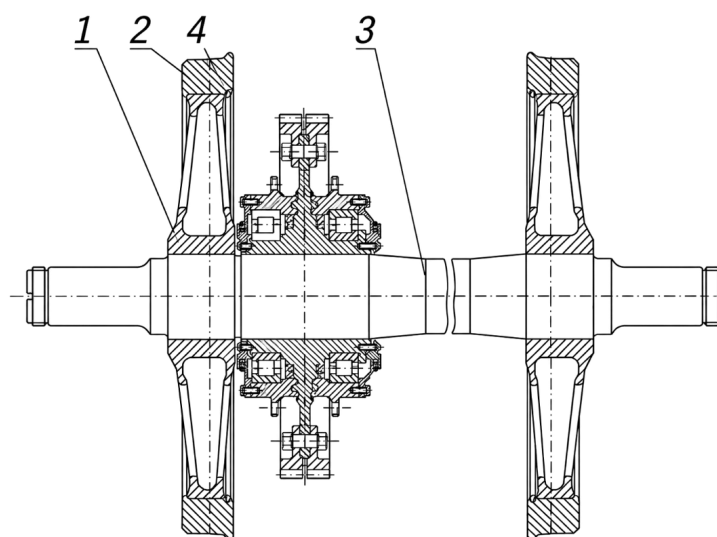


Рис. 9. Колесная пара электроваза ЭП1: 1 — центр колесный; 2 — бандаж; 3 — ось с зубчатым колесом; 4 — кольцо бандажное

привод — сначала I класса (на электровозе ВЛ60П/К), а затем II класса (Sr1 и ЭП1 (М, П)).

В кузовной ступени подвешивания вместо центральных и боковых опор, как у ВЛ60П/К, стали применять люлевное подвешивание и упругие качающиеся стержни (на средней тележке электровоза ЭП1 (М, П)). В конструкции буксового подвешивания вместо двух винтовых пружин и листовой рессоры стали устанавливать две пружины и гидравлический гаситель. Буксы бесчелюстные, двухповодковые.

Колесная пара электровоза ВЛ60П/К имеет два зубчатых колеса (разнесенный шеврон), тогда как у Sr1 и ЭП1 (М, П) — по одному. Колеса диаметром 1250 мм по кругу катания, бандажные. Ось колесной пары электровоза Sr1 пустотелая, что позволило уменьшить неподдресоренную массу.

В результате удалось существенно повысить тяговые и динамические показатели электровозов, а конструкционная скорость была увеличена со 110 до 140–160 км/ч.

Список источников

1. О генеральном плане электрификации железных дорог: постановление Совета Министров СССР от 03.02.1956 № 196-121.
2. Типы и основные параметры локомотивов: утв. распоряжением МПС России от 27.11.2002 № 747р.
3. Раков В. А. Электровозы переменного тока серии Н-О // Локомотивы отечественных железных дорог 1845–1955. М.: Транспорт, 1995. С. 429–432.
4. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования.

5. Дубровский З. М., Лорман Л. М. Электровозы ВЛ60К и ВЛ60П/К: руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1993. 400 с.

6. Раков В. А. Локомотивы отечественных железных дорог 1956–1975. М.: Транспорт, 1999. 443 с.

7. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков [и др.]. М.: Транспорт, 1992. 440 с.

8. Советский магистральный электровоз для Финляндии // Электрическая и тепловозная тяга. 1983. № 9. С. 36–37.

9. Электровоз ЭП1М (ЭП1П): руководство по эксплуатации: в 8 кн. Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2007.

10. Потанин А. А., Мысков О. В. Устройство, эксплуатация и ремонт электровозов серии ЭП1, ЭП1М(П). М.: РЖД, 2015. 344 с.

11. Измеров О. В. История тягового привода. URL: <https://izmerov.narod.ru/privod/index.html>

12. Магистральные электровозы. Общие характеристики. Механическая часть / В. И. Бочаров [и др.]. М.: Машиностроение, 1991. 221 с.

Дата поступления: 23.05.2026

Решение о публикации: 24.06.2026

Контактная информация:

АНДРЮЩЕНКО Андрей Александрович — кандидат техн. наук, начальник отдела по тяговым системам КБ «Локомотивы» ООО «ТМХ Инжиниринг»; a.andryuschenko@tmh-eng.ru

ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав»; zarifian_aa@mail.ru

ОРЛОВ Юрий Алексеевич — кандидат техн. наук, генеральный конструктор; y.orlov@tmh-eng.ru

Development of Chassis Design for AC Passenger Electric Locomotives: VL60P/K; Sr1; EP1(M, P)

A. A. Andryushchenko¹, A. A. Zarifyan², Yu. A. Orlov¹

¹ TMH Engineering LLC, bldg. 1, 54 Ozerkovskaya emb., Moscow, 115054, Russia

² Rostov State Transport University, bldg. 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: *Andryushchenko A. A., Zarifyan A. A., Orlov Yu. A.* Development of the Chassis Designs of AC Passenger Electric Locomotives: VL60P/K; Sr1; EP1(M, P) // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 548–560. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-548-560 (In Russian)

Abstract

Objective: to provide an analytical summary of the development of chassis designs for VL60P/K, Sr1, and EP1(M, P) AC passenger electric locomotives equipped with commutator traction motors, and to demonstrate the continuity of technical solutions from the first domestic locomotives to more modern locomotives. **Methods:** a comparative historical and technical analysis was used, based on both technical documentation and the authors' personal experience. The main mechanical components are examined: body, bogies, body-to-bogie connections, axlebox and body suspension, mechanical traction drive, traction gearboxes, and wheelsets. A comparison is made using axle formulas, traction and braking force transmission methods, traction motor suspension types, and design speeds. **Results:** it was established that the development of the running gear progressed from the VL60P/K electric locomotive with three-axle bogies, pintle-type longitudinal force transmission, leaf springs, and a first-class traction drive to the solutions implemented on the Sr1 and EP1(M, P): two-axle bogies, inclined rods, cradle suspension, coil springs with hydraulic dampers, and a second-class traction drive. The role of the Sr1 electric locomotive as an intermediate stage, during which solutions subsequently used on domestic passenger electric locomotives were refined, is demonstrated. Design changes to the wheelsets, gearboxes, and body-bogie connections are summarized. The result was an increase in the design speed from 110 to 140–160 km/h and improved dynamic performance. A unified set of criteria has been developed that allows for the abandonment of solutions that limited speed and increased unsprung mass in favor of more advanced load transfer systems. **Practical significance:** the article's materials can be used to analyze the evolution of domestic electric locomotive construction over the past 70 years, determine areas for chassis modernization, develop training courses, and formulate requirements for future 1520 mm gauge passenger electric locomotives. It also provides a basis for subsequent comparison with the EP10 and EP20 electric locomotives with asynchronous traction drives.

Keywords: AC passenger electric locomotives, chassis, body, bogies, body suspension, axlebox spring suspension, mechanical traction drive, toothed traction reducer, wheel pairs

References

1. Postanovlenie Soveta Ministrov SSSR ot 3 fevralya 1956 g. № 196-121 [Resolution of the Council of Ministers of the USSR], dated February 3, 1956, no. 196-121. (In Russian)
2. Tipy i osnovnye parametry lokomotivov [Types and Main Parameters of Locomotives], approved by

Order of the Ministry of Railways of Russia, dated November 27, 2002, no. 747r. (In Russian)

3. Rakov V. A. Elektrovozy peremennogo toka serii N-O [AC Electric Locomotives of the N-O Series], Locomotivy otechestvennykh zheleznih dorog 1845–1955 [Locomotives of Domestic Railways 1845–1955], Moscow, Transport Publishers, 1995, pp. 429–432. (In Russian)

4. GOST R 55364-2012. Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Electric Locomotives. General Technical Requirements]. Introduced January 1, 2014. (In Russian)
 5. Dubrovskiy Z. M., Lorman L. M. Elektrovozy VL60K i VL60P/K: rukovodstvo po ekspluatatsii [VL60K and VL60P/K Electric Locomotives: Operation Manual], Moscow, Transport, 1993, 400 p. (In Russian)
 6. Rakov V. A. Lokomotivy otechestvennykh zheleznnykh dorog 1956–1975 [Locomotives of Domestic Railways 1956–1975], Moscow, Transport, 1999, 443 p. (In Russian)
 7. Biryukov I. V., et al. Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava [Mechanical Part of Traction Rolling Stock], Moscow, Transport, 1992, 440 p. (In Russian)
 8. Sovetskij magistral'nyj elektrovoz dlya Finlyandii [Soviet Mainline Electric Locomotive for Finland], *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga [Electric and Diesel Traction]*, 1983, no. 9, pp. 36–37. (In Russian)
 9. Elektrovoz EP1M (EP1P): rukovodstvo po ekspluatatsii. V 8 kn. [EP1M (EP1P) Electric Locomotive: Operation Manual. In 8 Books], Novocherkassk, All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Engineering, 2007. (In Russian)
 10. Potanin A. A., Myskov O. V. Ustroistvo, ekspluatatsiya i remont elektrovozov serii EP1, EP1M(P) [Design, Operation and Repair of EP1, EP1M(P) Electric Locomotives], Moscow, Russian Railways, 2015, 344 p. (In Russian)
 11. Izmerov O. V. Istoriya tyagovogo privoda [History of Traction Drive]. URL: <https://izmerov.narod.ru/privod/index.html> (In Russian)
 12. Bocharov V. I., et al. Magistral'nye elektrovozy. Obshchie harakteristiki. Mekhanicheskaya chast' [Mainline Electric Locomotives. General Characteristics. Mechanical Part], Moscow, Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1991, 221 p. (In Russian)
- Received: May 23, 2026
Accepted: June 24, 2026
- Author's information:**
Andrey A. ANDRYUSHCHENKO — PhD in Engineering, Head of Traction Systems at KB “Locomotives” Department; a.andryuschenko@tmh-eng.ru
Alexander A. ZARIFYAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the “Traction Rolling Stock” Department; zarifian_aa@mail.ru
Yu. A. ORLOV — PhD in Engineering, General Designer; y.orlov@tmh-eng.ru

УДК 629.423.24

Устойчивость автоматизированной системы управления техническим состоянием высокоскоростных электропоездов

А. С. Космодамианский¹, И. И. Лакин²

¹ Российский университет транспорта, Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

² Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, Россия, 121205, Москва, Сколково, Большой бульвар, 40

Для цитирования: Космодамианский А. С., Лакин И. И. Устойчивость автоматизированной системы управления техническим состоянием высокоскоростных электропоездов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 561–571. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-561-571

Аннотация

В России создается высокоскоростная магистраль (ВСМ) Санкт-Петербург — Москва. Разрабатывается перспективный подвижной состав, от надежной работы которого зависит эффективность высокоскоростных перевозок. Требуется создание современной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), работа которой должна быть оптимизирована путем создания автоматизированной системы управления (АСУ) ТОиР. Недостаток АСУ как системы авторегулирования — риск неустойчивой работы, возникновения автоколебаний. **Цель работы:** решить задачи исключения колебаний АСУ ТОиР. **Методы:** для достижения поставленной цели предлагается использовать имитационное моделирование для подбора параметров системы и исключения возможных неустойчивых режимов работы. В качестве математической основы модели выбраны методы цепей Маркова с дискретным представлением времени, когда в соответствии с графом переходов состояние системы в каждый последующий момент времени полностью определяется ее состоянием в предыдущий момент. Для программной реализации модели выбран аппарат динамического моделирования «Сети Петри», который достаточно точно соответствуют цепям Маркова. Разработанная модель проверки устойчивости АСУ программно реализована на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel. **Результаты:** в качестве примера применения модели в статье рассмотрена система материально-технического снабжения ТОиР. Выявлено, что при некорректном выборе параметров системы возможны автоколебания запаса ремонтного комплекта на складе. Это может привести к дефициту переходного запаса и срывам в работе ТОиР. Показано, что избежать колебаний и дефицита можно за счет подбора параметров АСУ посредством итерационного моделирования — с последовательным изменением параметров системы. **Практическая значимость:** предложенный метод и разработанное программное обеспечение полезны на этапе проектирования АСУ ТОиР и при существенном изменении параметров действующей АСУ ТОиР.

Ключевые слова: высокоскоростная магистраль, электропоезд, надежность, техническое обслуживание и ремонт, устойчивость системы управления, математическое моделирование

Одним из важных направлений повышения качества жизни людей в мире является создание высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ), которые активно развиваются в последние 60 лет [1]. Повышение мобильности

населения — важный фактор производственно-экономического развития регионов и стран в целом. Проекты ВСМ безусловно окупаются и снимают инфраструктурные ограничения регионов, развивают бизнес, туризм и др.

В России создается первая в стране ВСМ Санкт-Петербург — Москва протяженностью 679 км [2]. Электропоезда ВСМ разрабатываются в Инжиниринговом центре железнодорожного транспорта (ИЦ ЖТ) [3], специально созданном ОАО «РЖД» и группой компаний «Синара» с привлечением ученых вузов, НИИ и специалистов смежных предприятий. Сборка составов будет производиться компанией «Уральские локомотивы» в городе Верхняя Пышма (Свердловская область, Екатеринбург). Первая партия электропоездов серии ЭВС360 «Белый кречет» должна состоять из 41 восьми-вагонного состава, достигающего максимальной скорости 400 км/ч [4].

Надежность — одно из главных качеств этого электропоезда [5]. Составы ВСМ должны обладать высокой надежностью [2]: коэффициент технической готовности (КТГ) должен составлять 0,95 и более, с учетом крупных ремонтов — 0,93 и более. Такую надежность невозможно обеспечить без создания современной крупноагрегатной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [6]. Для управления ТОиР обязательно создание автоматизированной системы управления (АСУ ТОиР) [7], которая представляет собой комплексную киберфизическую производственную систему (Cyber Physical Production System). АСУ ТОиР должна использовать

данные АСУ ОАО «РЖД», а также взаимодействовать с бортовой автоматизированной системой технического диагностирования для планирования объема ТОиР и потребных ресурсов с учетом фактического технического состояния оборудования составов [8].

В середине XX века Норберт Винер ввел термин «кибернетика» [9]. Применительно к производственным системам чаще используется термин «автоматизированная система управления» [10]. Направления исследований в кибернетике разнообразны и включают в себя распознавание образов, поддержку принятия решений, разработку математического аппарата управления (алгоритмов) и многое другое. Но главными были и остаются отрицательные обратные связи, определенные Винером как основа управления [9–11] (рис. 1).

Управляющее воздействие Y (блок 3) вырабатывается по заданным алгоритмам $\varphi(\Delta)$. Они определяются спецификой технологических процессов согласно известным математическим методам [11]) путем сравнения Δ (блок 2) задания X (блок 1) с состоянием объекта управления Z (блок 4). Наличие отрицательных обратных связей — главный и обязательный признак АСУ: замкнутые системы позволяют автоматизировать процесс управления.

Современные методические подходы к построению систем управления (в том числе

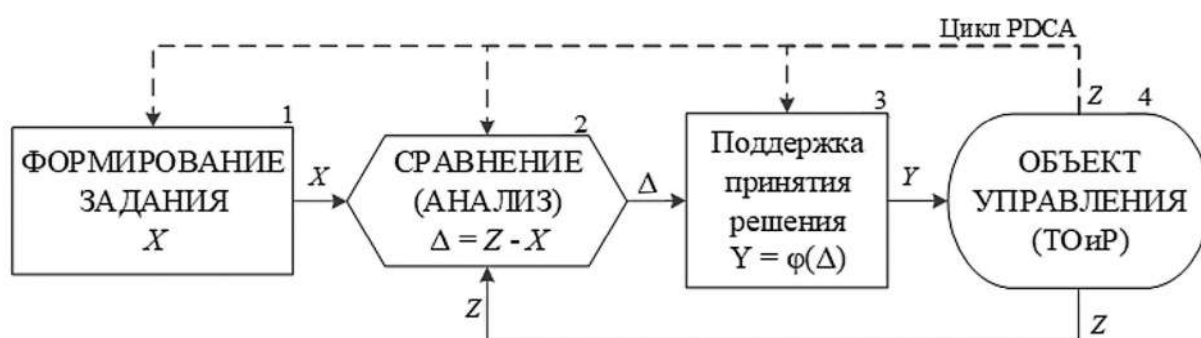


Рис. 1. Общий принцип построения АСУ

систем менеджмента качества и надежности) предполагают использование принципа постоянного улучшения Эдварда Деминга, известного также как цикл PDCA (Plan, Do, Check, Act) [12], суть которого автор образно сформулировал так: «Вы можете не меняться. Выживание не является обязанностью». На рис. 1 цикл PDCA показан пунктиром.

Важная задача АСУ — формирование достоверных исходных данных Δ . При управлении производственными процессами ТОиР сравнение Δ носит сложный характер (блок 2). Главное — это диагностика технического состояния оборудования (блок 4). Задание X (блок 1) — исправное или хотя бы работоспособное состояние состава, Z — фактическое

техническое состояние (блок 4), Y (блок 3) — рассчитанный объем ТОиР с учетом фактического технического состояния.

Автоматизация управления на базе IT-систем работы кадров, отдела труда и заработной платы, склада, финансового управления и отчетности, управления налогами и др. — решенная унифицированная задача [7]. Соответствующие пакеты программ известны как ERP- и MES-системы, реализуемые на покупных программах (SAP R/3, 1C:ERP, «Парус» и др.).

Для задачи создания АСУ предлагается использовать общую структуру управления ТОиР с выраженными обратными связями (рис. 2).

В процессе эксплуатации электроподвижного состава ВСМ (блок 1) формируется

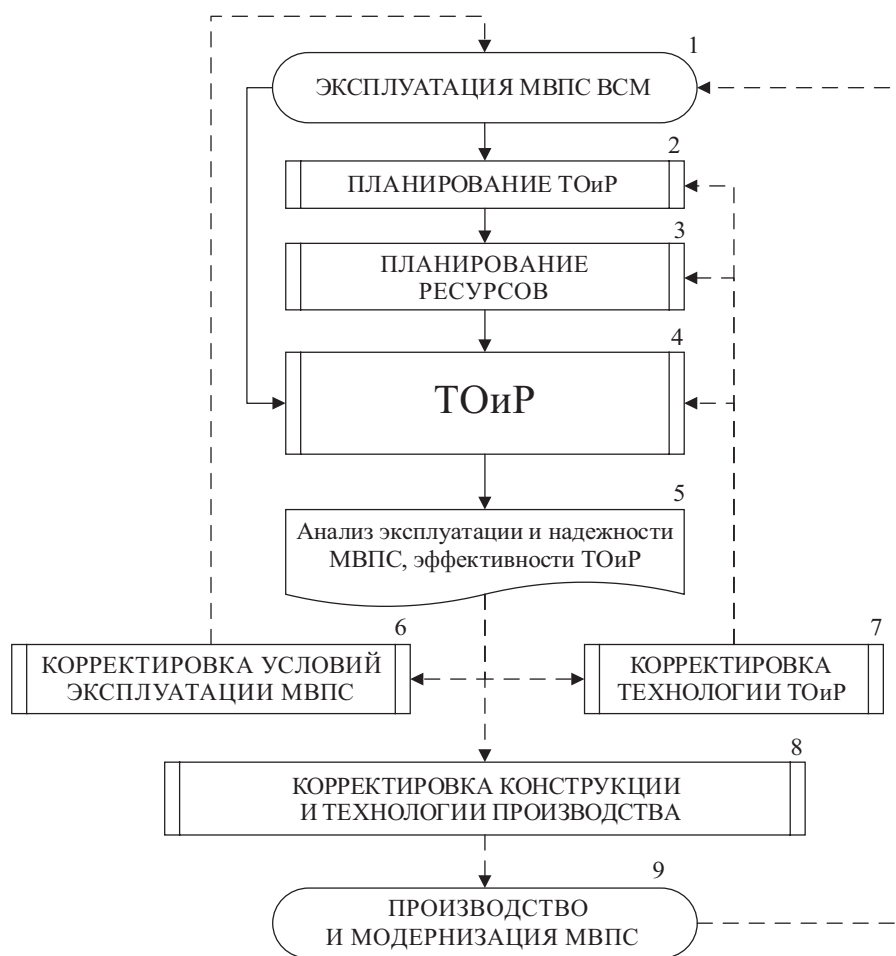


Рис. 2. Структура АСУ ТОиР

диагностическая информация о техническом состоянии оборудования по данным бортовой диагностики. Также получают данные о работе составов: пробег, населенность вагонов, интенсивность эксплуатации, другие эксплуатационные показатели. По этой информации, а также по наличию отказов и заданной периодичности планово-предупредительной системы ТОиР рассчитывается объем ТОиР (блок 2), на основании которого определяются потребные ресурсы ТОиР: трудовые, складские запасы, число ремонтных позиций и др. (блок 3). Затем осуществляется сам ТОиР (блок 4) с использованием АСУ ТОиР. Результаты эксплуатации и ТОиР периодически анализируются (блок 5) для формирования корректирующих мероприятий: изменение условий эксплуатации (блок 6) и технологии ТОиР (блок 7), конструкции составов (блок 8) как при производстве, так и при модернизации эксплуатируемого парка (блок 9).

Для анализа свойств модели АСУ ТОиР по описанному алгоритму авторами разработана имитационная математическая модель и соответствующая программа [13] на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel [14]. Программа позволяет рассматривать свойства АСУ ТОиР в различных режимах работы. В основу модели положены цепи Маркова [15] и сети Петри [16]. Фишками яв-

ляются составы, меняющие статусы согласно графу переходов (рис. 3).

Из любого состояния (статуса) графа можно попасть в другой статус — граф модели неразложим и сильно связан (сократить его нельзя). В любое состояние можно попасть за конечное число шагов по дням D и минутам t . Модель является периодической, так как всегда $\Delta t > 1$. Все статусы графа являются возвратными, так как всегда есть возможность перейти к другим статусам. Случайные процессы задаются в блоке 6: задержка рейса из-за отказа, неплановый ремонт, удлинение планового ТОиР. При этом основными параметрами являются интенсивности отказов от различных видов ТОиР и другие параметры, задаваемые до начала моделирования. В последующий момент времени $t + 1$ состояние модели определяется функцией перехода f от состояния в момент времени t :

$$S_{t+1} = f(S_t) = f(S_{t-1}) = \dots = f(S_{t_0}). \quad (1)$$

Состояние модели S определяется состоянием S_{tr} (техническим состоянием, местонахождением, пробегом и др.), совокупностью составов $Tr_i \in Tr$, состоянием (занятостью) ремонтных позиций $RP_i \in RP$ с наличием ожидания ремонта (очереди). У полигона имеется расписание поездов на сутки TT с неизменным состоянием $S_{TT} = \text{const}$, являющееся основанием для привязки составов Tr_i к поездам расписания —

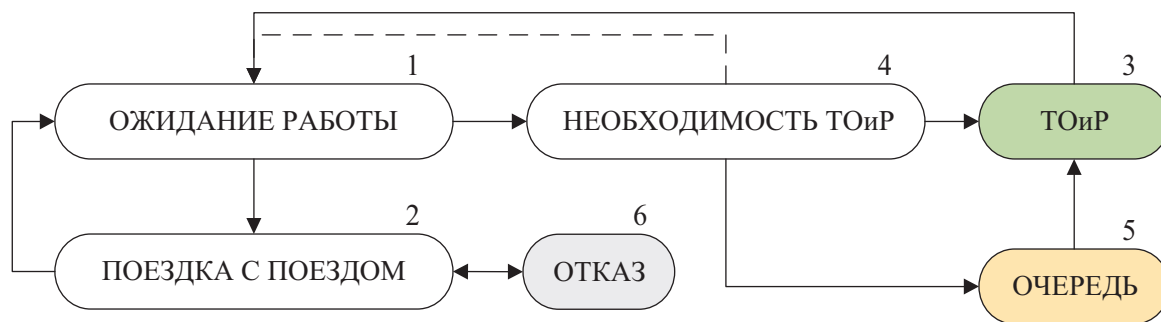


Рис. 3. Граф переходов модели ТОиР

формируется поминутное дневное движение поездов $S_D = f_D(DDD)$. Состояние модели S_Σ определяется совокупностью состояний ее компонентов:

$$S_{\Sigma, t+1} = f_\Sigma(S_{Tr, t}, S_{RP, t}, S_{TT, t}, S_{D, t}). \quad (2)$$

Расписание поездов определяется с точностью до минуты, поэтому минимальный шаг дискретной модели должен быть:

$$\Delta t_M = (t + 1) - t = 1 \text{ мин.} \quad (3)$$

При необходимом шаге согласно расписанию в 1 мин. имеется еще дневная дискретность d согласно повторению расписания:

$$\Delta t_D = (t_d + 1) - t_d = 1 \text{ день.} \quad (4)$$

В АСУ, как в системе с обратными связями, возможны проблема устойчивости [10, 11, 17], риск возникновения колебаний и даже автоколебаний. На рис. 4 приведены примеры пере-

ходного процесса при достижении заданного параметра.

Для АСУ разработан ряд критериев математического определения устойчивости системы: алгебраические, Рауса, Гурвица, Михайлова, Найквиста и др. [11]. Но киберфизическая система управления АСУ ТОиР является прерывной и нелинейной. АСУ не поддается непрерывному дифференцированию, что делает практически неприменимыми методы определения устойчивости. Представляется целесообразным имитационное моделирование с определением возможных колебаний системы согласно теории массового обслуживания с использованием цепей Маркова и сетей Петри. В результате моделирования должны быть определены параметры, при которых АСУ будет устойчива в достижении установившегося режима с допустимыми статическими и динамическими ошибками.

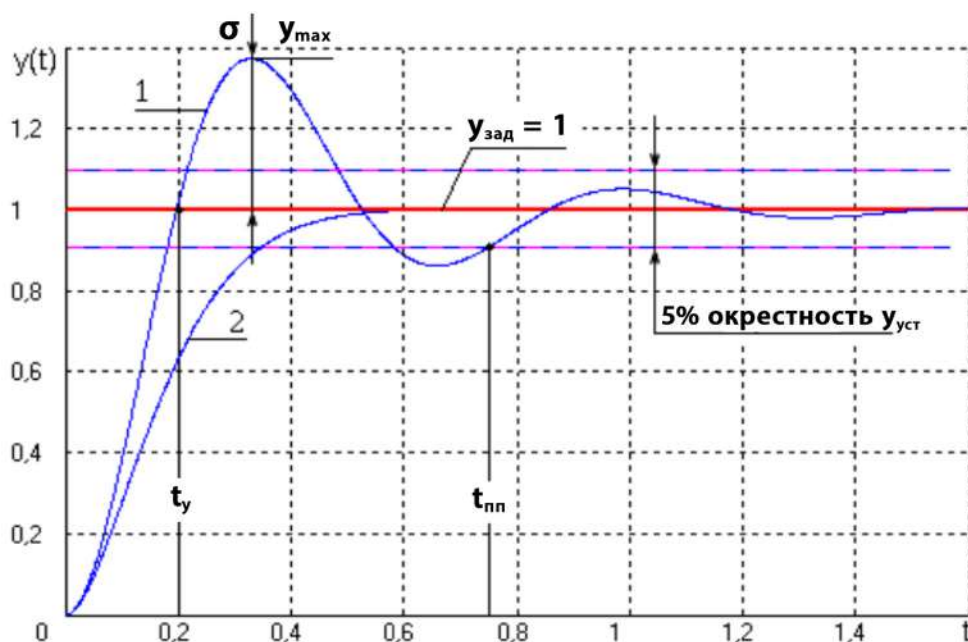


Рис. 4. Общий принцип АСУ [17]: 1 — с перерегулированием, 2 — без перерегулирования, где $t_{пп}$ — время переходного процесса, t_y — время установления сигнала в первый раз, σ — перерегулирование, $\sigma = (y_{\max} - y_{\text{зад}}) / y_{\text{зад}}$ — относительное перерегулирование

В рассмотренном примере за основу взята модель управления ресурсами. Пусть задан неснижаемый запас деталей на складе *Norma*. Ежедневный расход деталей на устранение отказов (детерминированный или стохастический согласно нормальному закону распределения) составляет *Otkaz* деталей. На складе находится *Ostatok* деталей, отличающийся от норматива на $\Delta = \text{Norma} - \text{Ostatok}$. Если $\Delta < 0$, значит, возник недопустимый дефицит. При отсутствии стохастических процессов берутся математические ожидания. В примере это по 4 дня на доставку и 2 дня на ремонт (изготовление) — всего 10 дней (см. таблицу). Необходимо по исходным данным определить размер заказа деталей *Zakaz* для поддержания неснижаемого запаса по одному из возможных алгоритмов и моделированием определить устойчивость системы.

ТАБЛИЦА. Исходные данные для расчета

Данные Участка	Параметр
Среднее число ремонтов узла, шт.	10
СКО	1,1
1. Доставка минимум, дней	3
2. Доставка норма, дней	4
3. Доставка задержка, дней	6
4. Задержка максимум, дней	10
Начальный запас узлов, шт.	150
Неснижаемый запас, норматив, шт.	50
Данные Центра	Параметр
Среднее число ремонтов в день, шт.	25
СКО числа ремонтов в день	2
1. Ремонт минимум, дней	1
2. Ремонт норма, дней	2
3. Ремонт задержка, дней	3
4. Задержка максимум, дней	7

За основу взята разработанная модель ТОиР с использованием цепей Маркова и сетей Петри. Шаг взят с точностью до дня $\Delta t = \Delta t_D = 1$ день.

Первым смоделирован простейший алгоритм, при котором заказ *Zakaz* равен расходу *Otkaz* (рис. 5): $Zakaz = Otkaz$. Число деталей на складе уменьшается с начально заданных $Ostatok = 150$ в темпе расхода $Otkaz = 10$, пока не начнут с задержкой через $4 + 2 + 4 = 10$ дней поступать детали из Центра. Процесс стабилизируется. При расходе $Otkaz = 10$ деталей запас стабилизировался на уровне 50 деталей, соответствующем нормативу: $Ostatok = 150 - 10 \cdot 10 = 50$. При $Otkaz = 15$ запас стал нулевым: $Ostatok = 150 - 10 \cdot 15 = 0$. При дальнейшем увеличении расхода деталей на складе не хватит. Алгоритм является разомкнутым и неуправляемым.

Автоколебания возникли при заказе деталей по разнице между нормативом *Norma* и остатком на складе *Ostatok*, даже при частичной защите от перерегулирования (рис. 6).

Автоколебания — опасное явление в АСУ. В рассмотренном примере возник дефицит деталей. Возможны «разносные» автоколебания, происходящие с увеличением амплитуды колебаний. Подбором параметров колебания системы можно минимизировать (рис. 7).

Процесс с тем же алгоритмом управления при заданном стохастическом процессе приведен на рис. 8, а за период 1000 дней. Моделирование показало наличие риска дефицита деталей (в примере — на 270-й и 438-й день). Увеличение неснижаемого запаса $Norma = 60$ (рис. 8, б) устранило проблему — имитационным моделированием подбираются параметры системы при выбранном алгоритме управления с обеспечением устойчивости. При автоматическом управлении тяговым приводом подвижного состава возникновение колебаний достаточно очевидно: изменения скорости, тока,

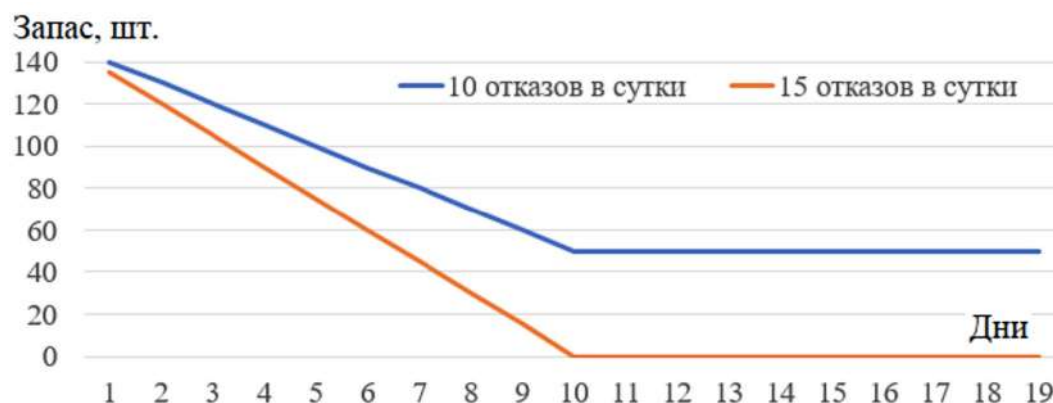


Рис. 5. Отсутствие выхода на заданный норматив АСУ

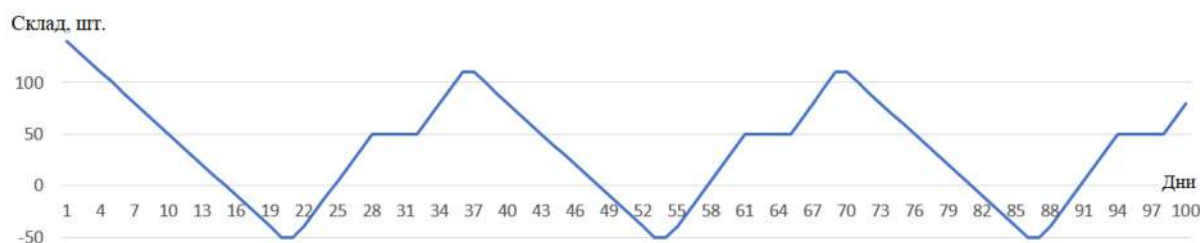


Рис. 6. Автоколебания АСУ

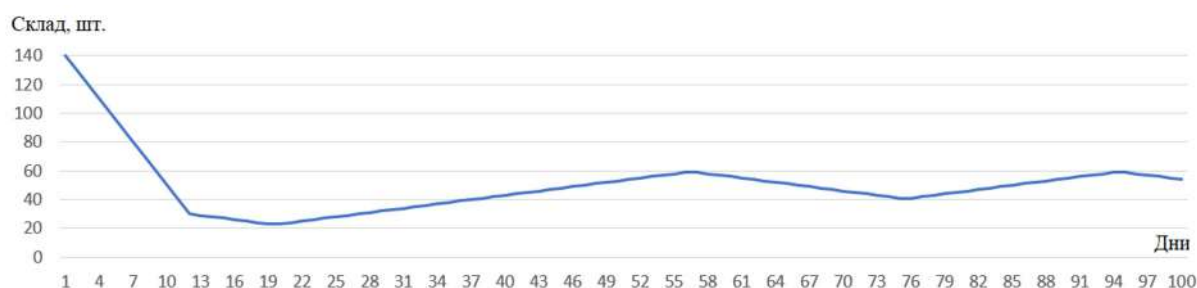


Рис. 7. Нормальное управление АСУ по отклонению

напряжения, давления, температуры в салоне и др. легко измеримы.

В АСУ отличить колебания системы от регулирования не так просто даже в приведенном относительно простом примере. Более того, если в приводе колебания имеют частоту от миллисекунд до минуты (легко наблюдаемы), то в АСУ — это часы, дни, месяцы и более (трудно наблюдаемы). Напри-

мер, неправильное планирование трудовых ресурсов обнаружится через дни, неправильный заказ технологического оборудования — через месяцы, неправильный выбор числа ремонтных позиций — через годы. Поэтому имитационное моделирование процессов АСУ ТОиР особенно актуально. Его также можно включать в число встроенных методов для проверки принимаемых управляющих

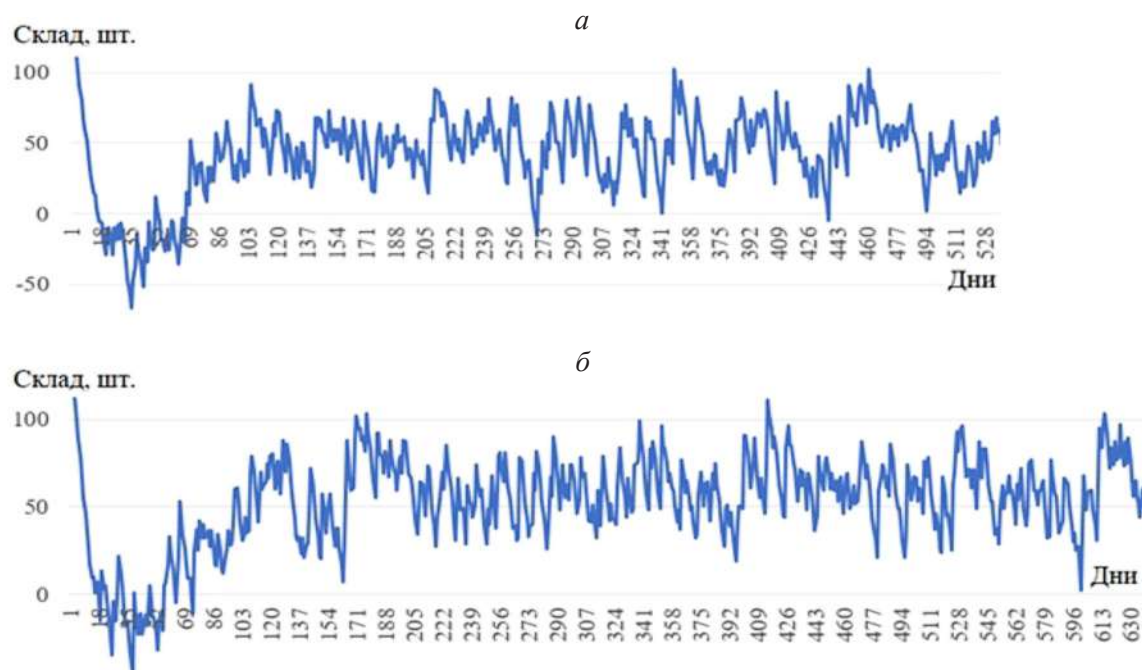


Рис. 8. Управление АСУ при стохастических процессах:

а — *Norma* = 50, *б* — *Norma* = 60

воздействий на их корректность в части устойчивости системы.

Вывод: авторами предлагается при разработке и сопровождении АСУ ТОиР подвижного состава использовать математическую модель на базе цепей Маркова и сетей Петри для имитационного моделирования процессов ремонтного депо с целью подбора параметров системы для исключения возможных колебаний системы.

Список источников

1. Скоростные железные дороги Японии. Синкансен / пер. с япон. М.: Транспорт, 1984. 199 с.
2. Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации. М.: ОАО «РЖД». 2015. 152 с.
3. Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта // Официальный сайт ИЦ ЖДТ. URL: <https://ecrt.ru>

4. Сайт национального проекта «Развитие высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ)». URL: <https://vsmholdng.ru>

5. Горский А. В., Воробьев А. А. Надежность электроподвижного состава. М.: Маршрут, 2005. 303 с.

6. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В. И. Киселев [и др.]. М.: ИРИС-Групп, 2012. 576 с.

7. 1С:ТОИР. Управление ремонтами и техническим обслуживанием оборудования: официальный сайт. URL: <https://solutions.1c.ru/eam>

8. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис. Теория и практика / К. В. Липа [и др.]. М.: ЛокоТех, 2015. 212 с.

9. Винер Н. Человек управляющий. СПб.: Питер, 2001. 288 с.

10. Луков Н. М., Космодамианский А. С. Автоматические системы управления локомотивов. М.:

Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. 429 с.

11. Савоськин А. Н., Баранов Л. А., Плакс А. В. Автоматизация электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1990. 311 с.

12. Ассоциация Деминга. URL: <https://www.deming.ru>

13. Галахов А. Н., Лакин И. И., Скворцов Д. Д. Моделирование технического обслуживания и ремонта высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 4. С. 52–67.

14. Уокенбах Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA / пер. с англ. М.: И. Д. Вильямс, 2014. 944 с.

15. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Академия, 2003. 464 с.

16. Шалыто А. А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000. Глава 11: Сети Петри, графы операций и графы переходов.

17. Устойчивость систем автоматического управления. Основы теории управления. URL: <https://ideafix.su/university/ASU/lectures>. UDC 629.423.24

Дата поступления: 07.05.2026

Решение о публикации: 22.06.2026

Информация об авторах:

КОСМОДАМИАНСКИЙ Андрей Сергеевич — доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав»; askosm@mail.ru

ЛАКИН Игорь Игоревич — кандидат техн. наук, ведущий эксперт группы интеграции систем управления, диагностики, безопасности и радиосвязи; lakin16@mail.ru

The Automated Control System Stability for the High-speed Electric Trains Technical Condition

A. S. Kosmodamianskij¹, I. I. Lakin²

¹ Russian Transport University (RUT), bldg. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russia

² Railway Transport Engineering Center, 40 Bolshoy Boulevard, Skolkovo, Moscow, 121205, Russia

For citation: *Kosmodamianskij A. S., Lakin I. I. The Automated Control System Stability for the High-speed Electric Trains Technical Condition // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 561–571. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-561-571 (In Russian)*

Abstract

A high-speed highway (HSR) St. Petersburg — Moscow is being created in Russia. A promising rolling stock is being developed, on the reliable operation of which the efficiency of high-speed transportation depends. It requires the creation of a modern maintenance and repair system (MRO), the operation of which should be optimized by creating an automated control system (ACS) MRO. The disadvantage of automated control systems as an auto — regulation system is the risk of unstable operation and the occurrence of self-oscillations. **The purpose** of the work is to solve the problems of eliminating vibrations of the MRO control system. **Methods:** to achieve this goal, it is proposed to use simulation modeling to select system parameters and eliminate possible unstable operating modes. As the mathematical basis of the model, Markov chain methods with a discrete representation of time are chosen, when, in accordance with the graph of transitions, the state of the system at each subsequent moment in time is completely determined by its state at the previous moment. For the software implementation of the model, the dynamic modeling apparatus “Petri

Nets” has been chosen, which correspond quite accurately to Markov chains. The developed automated control system stability control model is programmatically implemented in the algorithmic language Visual Basic for Applications (VBA) in the MS Excel environment. **Results:** as an example of the application of the model, the article considers the MRO logistics system. It was revealed that if the system parameters are incorrectly selected, self-fluctuations in the stock of the repair kit in the warehouse are possible. This can lead to a shortage of the transition stock and disruptions in the MRO operation. It is shown that fluctuations and shortages can be avoided by selecting the parameters of the automated control system through iterative modeling, with sequential changes in the system parameters. **Practical significance:** the proposed method and the developed software are useful: at the design stage of the MRO control system, with a significant change in the parameters of the current MRO control system.

Keywords: high-speed highways, electric trains, reliability, maintenance and repair, stability of the control system, mathematical modeling

References

1. Skorostnye zheleznye dorogi Yaponii. Sinkansen [High-Speed Railways of Japan. Shinkansen], translated from Japanese, Moscow, Transport, 1984, 199 p. (In Russian)
2. Programma organizatsii skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya v Rossiyskoy Federatsii [Program for Organizing High-Speed and Ultra-High-Speed Railway Services in the Russian Federation], Moscow, JSC Russian Railways, 2015, 152 p. (In Russian)
3. Inzhiniringovyy tsentr zheleznodorozhnogo transporta [Railway Transport Engineering Center]. Official website of EC RT. URL: <https://ecrt.ru> (In Russian)
4. Sajt natsional'nogo proekta “Razvitie vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralej (VSM)” [Website of the national project “Development of High-speed Rail Lines (HSR)”]. URL: <https://vsmholdng.ru> (In Russian)
5. Gorskiy A. V., Vorob'ev A. A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of Electric Rolling Stock], Moscow, Marshrut, 2005, 303 p. (In Russian)
6. Kiselev V. I., et al. Ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava [Operation and Maintenance of Rolling Stock], Moscow, IRIS-Grupp, 2012, 576 p. (In Russian)
7. IS:TOIR. Upravlenie remontami i tekhnicheskimi obsluzhivaniem oborudovaniya: ofitsial'nyj sayt [IC: TOIR. Equipment Repair and Maintenance Management: Official Website]. URL: <https://solutions.1c.ru/eam>
8. Lipa K. V., et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov v TMKh-Servis. Teoriya i praktika [Monitoring the Technical Condition and Operating Modes of Locomotives at TMH-Service. Theory and Practice], Moscow, LokoTekh, 2015, 212 p. (In Russian)
9. Wiener N. Chelovek upravlyayushchiy [The Human as Controller], St. Petersburg, Piter, 2001, 288 p. (In Russian)
10. Lukov N. M., Kosmodamianskiy A. S. Avtomaticheskie sistemy upravleniya lokomotivov [Automatic Control Systems for Locomotives], Moscow, Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2007, 429 p. (In Russian)
11. Savos'kin A. N., Baranov L. A., Plaks A. V. Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava [Automation of Electric Rolling Stock], Moscow, Transport, 1990, 311 p. (In Russian)
12. Deming Association [Assotsiatsiya Deminga]. URL: <https://www.deming.ru> (In Russian)
13. Galakhov A. N., Lakin I. I., Skvortsov D. D. Modelirovanie tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta vysokoskorostnykh elektropoezdov s ispol'zovaniem dannykh bortovykh sistem diagnostiki [Modeling Maintenance and Repair of High-Speed Electric Trains Using Onboard Diagnostic System Data], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*

[*Bulletin of Research Results*], 2023, no. 4, pp. 52–67. (In Russian)

14. Walkenbach J. Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA [Excel 2010: Professional VBA Programming], translated from English, Moscow, I.D. Vil'yams, 2014, 944 p. (In Russian)

15. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya [Probability Theory and Its Engineering Applications], Moscow, Akademiya, 2003, 464 p. (In Russian)

16. Shalyto A.A. Logicheskoe upravlenie. Metody apparatnoy i programnoy realizatsii algoritmov. Glava 11: Seti Petri, grafy operatsiy i grafy perekhodov [Logical Control. Methods of Hardware and Software Implementation of Algorithms. Chapter 11: Petri Nets, Operation Graphs, and Transition Graphs], St. Petersburg, Nauka, 2000, 780 p. (In Russian)

17. Ustoychivost' sistem avtomaticheskogo upravleniya. Osnovy teorii upravleniya [Stability of Automatic Control Systems. Fundamentals of Control Theory]. URL: <https://ideafix.su/university/ASU/lectures>. UDC 629.423.24 (In Russian)

Received: May 07, 2026

Accepted: June 22, 2026

Author's information:

Andrej S. KOSMODAMIANSKIY — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the “Traction Rolling Stock” Department; askosm@mail.ru

Igor I. LAKIN — PhD in Engineering, Leading expert of the Control, Diagnostic, Safety and Radio Communication Systems Integration Group; lakin16@mail.ru

УДК 656.259.12+621.313.333+629.4.054.2

Экспериментальная оценка параметров электромагнитной помехи от асинхронного тягового привода в канале связи автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене

Р. О. Рядчиков, В. С. Кузьмин, Н. О. Жухин, А. И. Швойн

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Россия, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Рядчиков Р. О., Кузьмин В. С., Жухин Н. О., Швойн А. И. Экспериментальная оценка параметров электромагнитной помехи от асинхронного тягового привода в канале связи автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 572–586. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-572-586

Аннотация

Цель: экспериментально определить характеристики действующей в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости (АЛС-АРС) на метрополитенах электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода. На основе полученных результатов показать необходимость учета влияния такой помехи на работу приемников в составе поездных устройств при расследовании случаев сбоев и нарушений в работе автоматики и телемеханики управления движением поездов (АТДП). **Методы:** включают анализ научной и технической литературы, посвященной вопросам определения параметров электромагнитной обстановки, характерной для условий эксплуатации бортовых устройств автоматики и телемеханики и формируемой при работе асинхронного тягового привода электрического подвижного состава. Экспериментальное исследование проводилось в условиях лабораторий кафедр «Электропоезда и локомотивы» и «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» путем задания с использованием преобразователя частоты величин тока и частоты питания в обмотках статора, изменения взаимного расположения приемных катушек КП-АРС относительно асинхронного тягового двигателя и измерения величины электродвижущей силы (ЭДС), наводимой в приемных катушках, с использованием анализатора спектра ZETLAB ZET 017-U8 и дифференциального пробника PINTEX DP-50. Обработка результатов выполнена с использованием известных методов математической статистики. **Результаты:** построены характерные зависимости действующего значения ЭДС, наводимой в приемных катушках поездных устройств внешним электромагнитным полем при изменении высоты подвеса относительно уровня головки ходового рельса, бокового смещения относительно вертикальной оси ходового рельса и расстояния от оси вращения двигателя. Определен спектральный состав помехи. **Практическая значимость:** полученные результаты уточняют характер электромагнитной обстановки в условиях эксплуатации АЛС-АРС на метрополитенах, верифицируют ранее полученные результаты компьютерного моделирования и разработанные математические модели и будут использованы в будущем для совершенствования процесса сервисного сопровождения бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, внешнее электромагнитное поле, метрополитен, поездные устройства безопасности, индуктивный канал связи, асинхронный тяговый привод

Введение

Повышение надежности функционирования систем автоматики и телемеханики движения поездов на метрополитенах (далее — АТДП), в составе которых для трансляции приказов разрешения/запрета на движение к поездным устройствам используют индуктивный канал передачи информации, представляет собой комплексную задачу. Ее решение связано в том числе и с необходимостью оценки соответствующей электромагнитной обстановки в условиях эксплуатации, установлением характера ее влияния на соотношение «сигнал/помеха» на входе приемника и искажения сигналов автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости (далее — АЛС-АРС) для совершенствования принципов и подходов к реализации сервисного сопровождения бортовой аппаратуры, а также повышения помехоустойчивости ее работы. На основе проводимых в данном направлении исследований наиболее подробно изученным источником помехи в канале индуктивной связи АЛС-АРС является тяговая рельсовая сеть [1, 2]. В рамках проводимых исследований производилась количественная оценка уровня помехи, формируемой при протекании тягового тока в рельсовой линии, на входе путевых и поездных приемников [3–5]. При этом особое внимание уделялось определению параметров, в том числе частотного состава электромагнитных помех, характерных для асинхронных тяговых двигателей. Однако соответствующие работы ограничивались только определением влияния тягового тока на работу устройств АЛС-АРС [6–8].

Следует однако отметить, что мешающее влияние на работу приемной аппаратуры АЛС-АРС оказывает не только тяговый ток, но и внешние электромагнитные поля, харак-

терные для различного силового оборудования электрического подвижного состава, в частности асинхронного тягового двигателя. Анализ исследований в данной области показал значительную разработанность вопроса оценки характеристик таких электромагнитных полей в рамках исследований в области охраны труда локомотивных бригад и построения средств диагностики асинхронных тяговых двигателей [8–10]. При этом оценка влияния таких полей на работу приемных устройств АЛС-АРС в отечественной литературе ранее не приводилась. Имеются отдельные зарубежные исследования, посвященные данному вопросу, в частности [11]. Однако их результаты оказываются неприменимы к отечественным условиям эксплуатации ввиду особенностей размещения асинхронных двигателей относительно приемных катушек. С учетом этого целью настоящей работы является экспериментальное определение характеристик действующей в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитенах электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода.

Материалы и методы

Для определения характера действующей в канале индуктивной связи АЛС-АРС на метрополитенах электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода, было выполнено экспериментальное исследование в условиях лаборатории. Состав стенда для проведения исследований с указанием наименований средств измерений и типа аппаратуры показан на рис. 1. Исследование выполнено без учета экранирующего влияния



Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда для изучения влияния внешних полей

кузова и других элементов подвижного состава, характер которого описан в работе [12]. При этом в условиях лаборатории в непосредственной близости от стенда отсутствовали какие-либо экранирующие элементы и конструкции.

Взаимное расположение между приемной катушкой КП-АРС и асинхронным тяговым двигателем выбиралось с учетом особенностей эксплуатации данного оборудования¹ (рис. 2).

Результаты и обсуждения

В ходе выполнения эксперимента определялись значение ЭДС и частотный состав помехи в диапазоне работы АЛС-АРС, наводимой в приемной катушке от рассматриваемого источника помехи. Величина тока пи-

тания в обмотках статора, если не оговорено иное, при частоте 50 Гц равна 3,75 А. Спектр сигнала, наводимого в приемной катушке КП-АРС в условиях выключенного силового оборудования, характеризующий фоновую электромагнитную обстановку в условиях лаборатории и учитываемый в дальнейшем при интерпретации полученных результатов, показан на рис. 3.

На первоначальном этапе была произведена оценка влияния внешнего электромагнитного поля при изменении частоты питающего тока от 0 до 50 Гц. Примеры полученных спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС на характерных частотах питающего тока рассматриваемого асинхронного двигателя показаны на рис. 4.

Была произведена оценка влияния изменения расстояния между приемной катушкой и асинхронным двигателем в диапазоне l_y от 0,35 до 1,25 м на величину ЭДС, наводимую

¹ Состав из вагонов метрополитена моделей 81-765, 81-766, 81-767. Руководство по эксплуатации. Часть 1. 7650.30.00.001 РЭ.

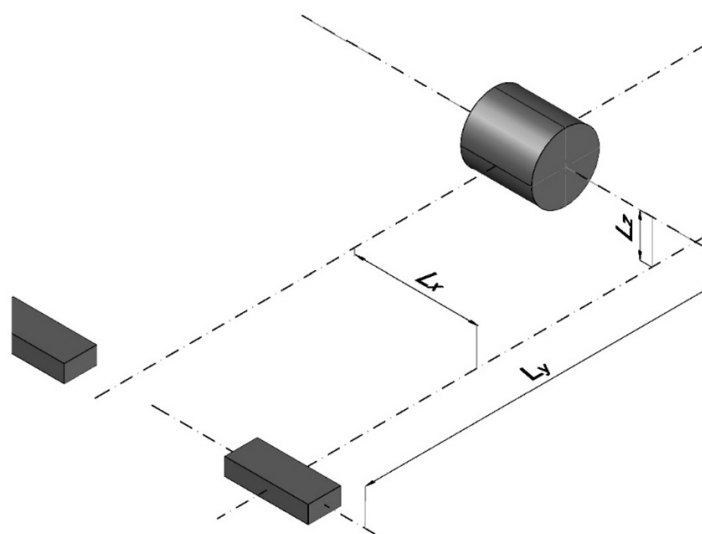


Рис. 2. Схема взаимного расположения приемной катушки и двигателя: l_z — высота подвеса приемных катушек относительно оси вращения ротора электродвигателя, м (в рамках проведения исследования, если не оговорено иное, $l_z = 0,213$ м, что соответствует высоте подвеса относительно уровня головки рельса $h_{\text{УГР}} = 0,210$ м); l_x — смещение приемной катушки относительно оси пути, м (в рамках проведения исследования, если не оговорено иное, $l_x = 0,2$ м); l_y — расстояние от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути, м (в рамках проведения исследования, если не оговорено иное, $l_y = 0,75$ м).

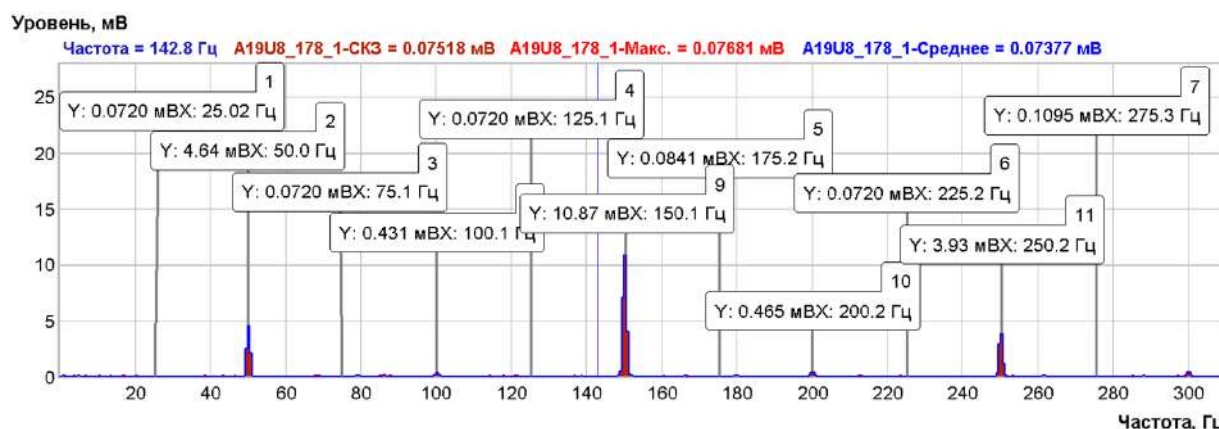


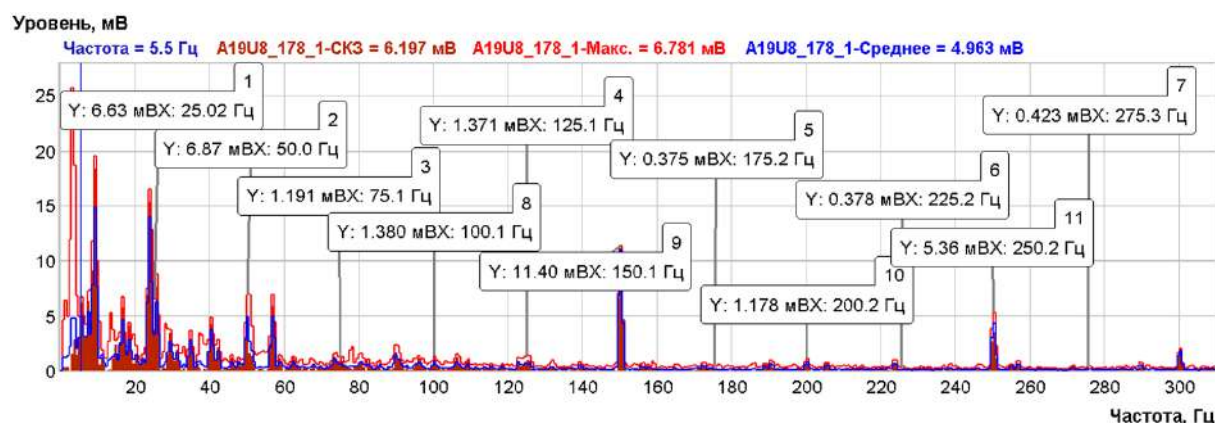
Рис. 3. Спектр сигнала на выходе приемной катушки КП-АРС при отключенном электродвигателе

внешним электромагнитным полем. Примеры полученных спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС показаны на рис. 5.

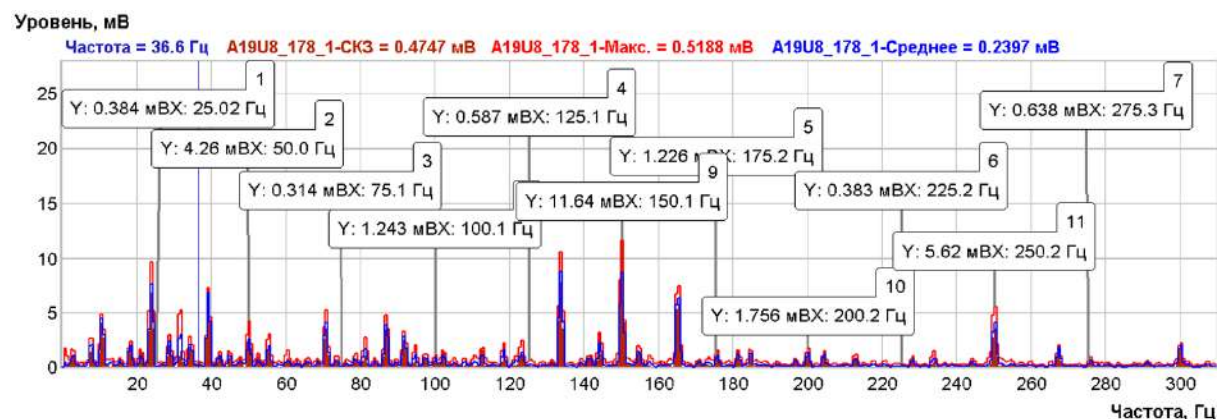
Полученный в результате обработки экспериментальных данных график зависимости действующего значения ЭДС, наведенной

в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от расстояния l_y от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути для частоты 50 Гц показан на рис. 6.

а



б



в

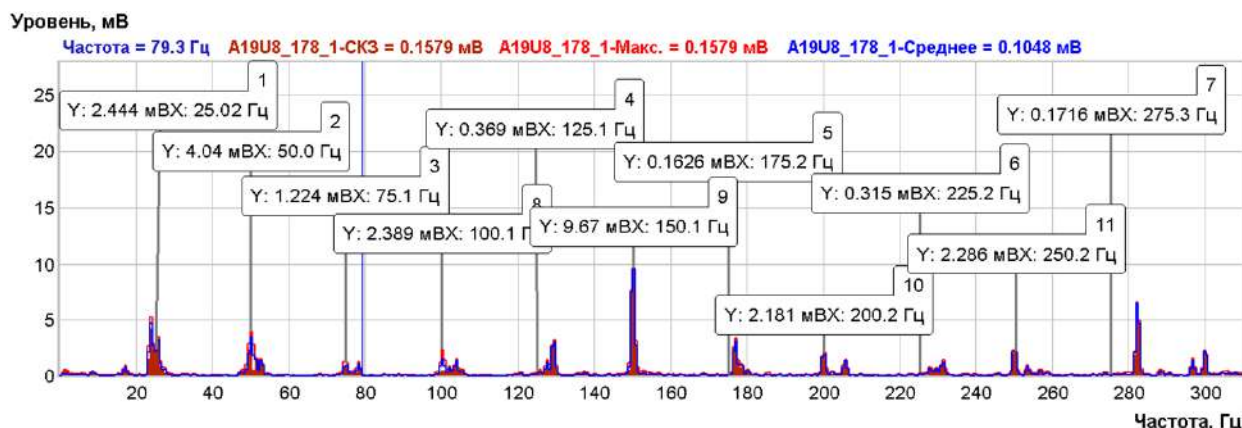
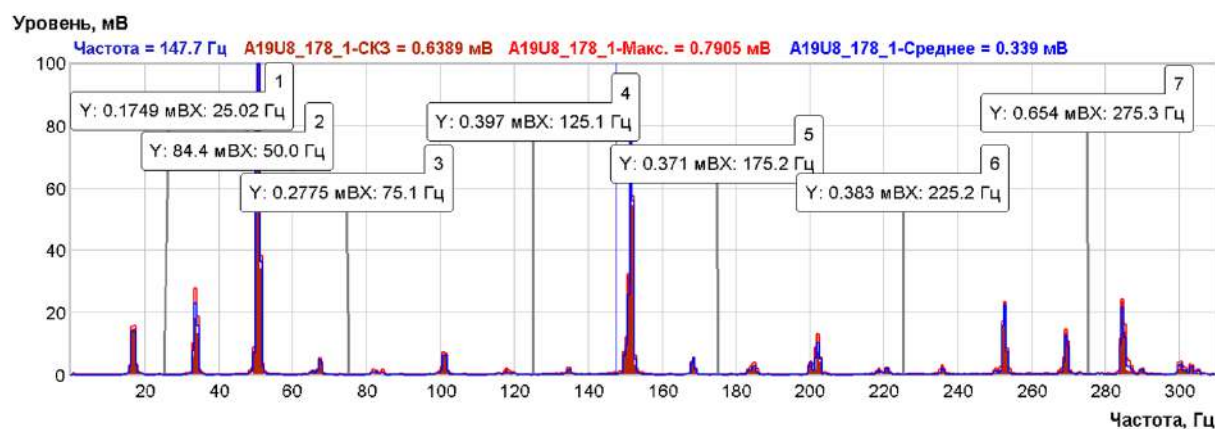
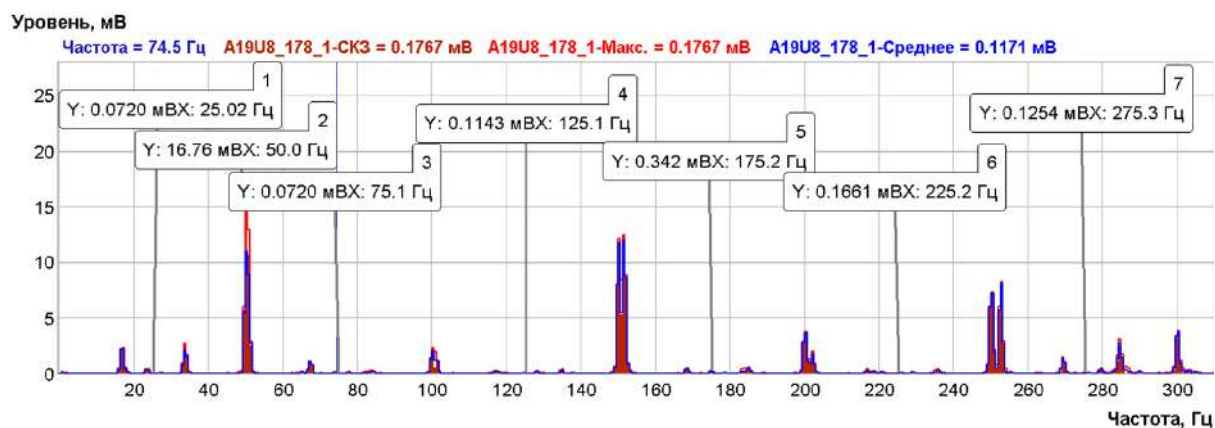


Рис. 4. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях частоты тока питания двигателя: а — 5,5 Гц; б — 10,5 Гц; в — 25,5 Гц

а



б



в

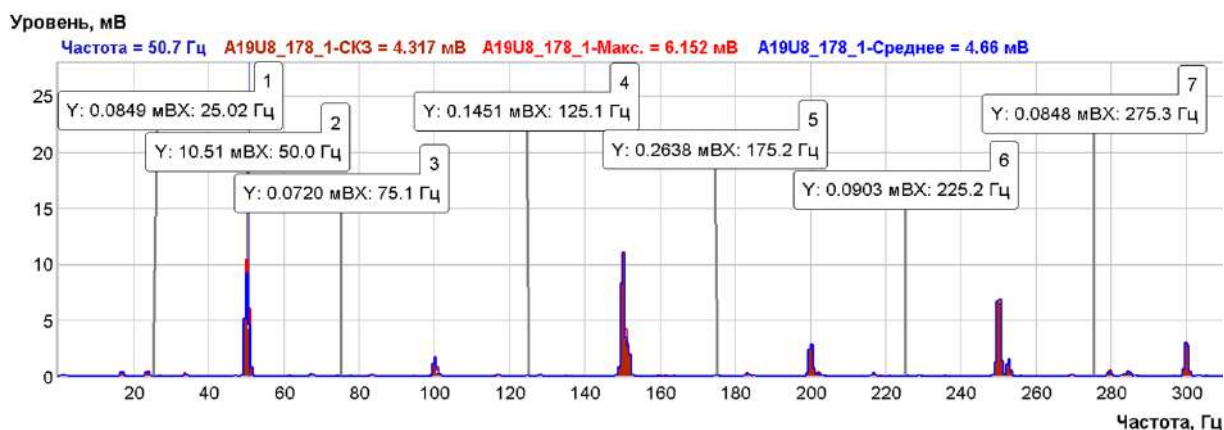


Рис. 5. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях: а — $l_y = 0,35$ м; б — $l_y = 0,75$ м; в — $l_y = 1,2$ м

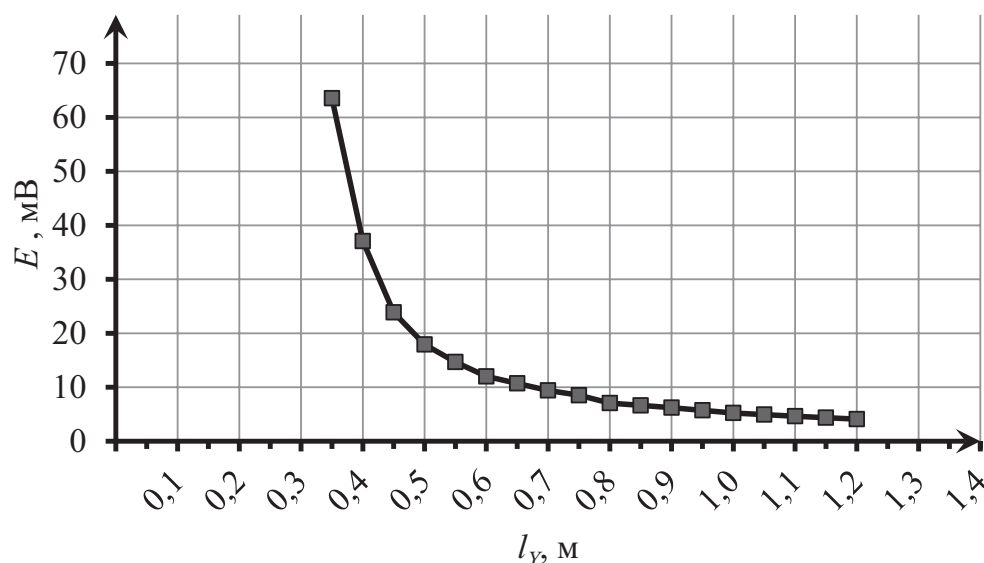


Рис. 6. График зависимости действующего значения ЭДС, наведенного в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от расстояния l_y от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути

Далее была произведена оценка влияния смещения l_x приемной катушки относительно оси пути в диапазоне от 0 до 0,55 м на величину ЭДС, наводимую внешним электромагнитным полем. Примеры полученных спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС показаны на рис. 7.

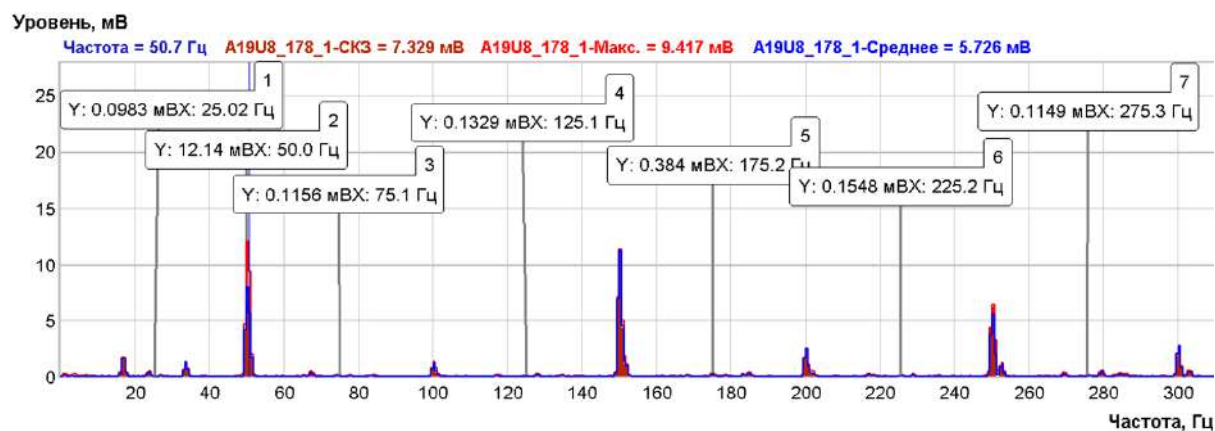
Полученный в результате обработки данных график зависимости действующего значения ЭДС, наведенной в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от смещения l_x относительно оси пути для частоты 50 Гц показан на рис. 8.

В заключение была произведена оценка влияния высоты $h_{угр}$ подвеса приемной катушки от уровня головки рельса в диапазоне от 105 до 195 мм на величину ЭДС, наводимую внешним электромагнитным полем. Примеры соответствующих спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС показаны на рис. 9.

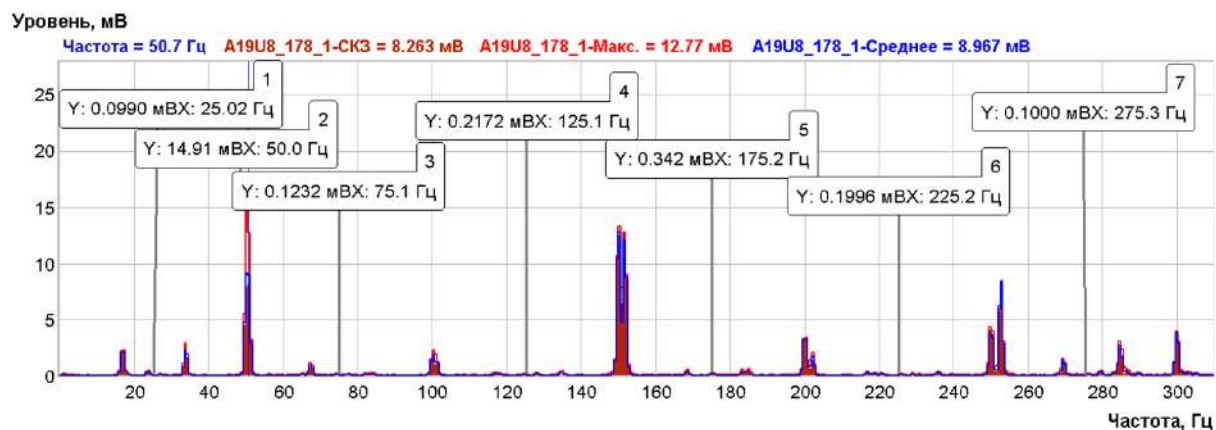
Полученный в результате график зависимости действующего значения ЭДС, наведенной в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от высоты $h_{угр}$ подвеса относительно уровня головки рельса и расстояния l_y от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути для частоты 50 Гц показан на рис. 10.

На основе полученных результатов экспериментального исследования установлено, что уровень действующего значения ЭДС помехи на частоте 50 Гц находится в диапазоне от 4,82 до 63,64 мВ. Частотный состав помехи при работе асинхронного тягового двигателя совпадает с частотой тока электродвигателя, что указывает на аддитивный характер помехи в диапазоне частот источника до 300 Гц. Учет нелинейности амплитудно-частотной характеристики приемной катушки в области частот до 5 кГц для катушки типа КП-АРС может быть выполнен аналогично исследованию [13].

а



б



в

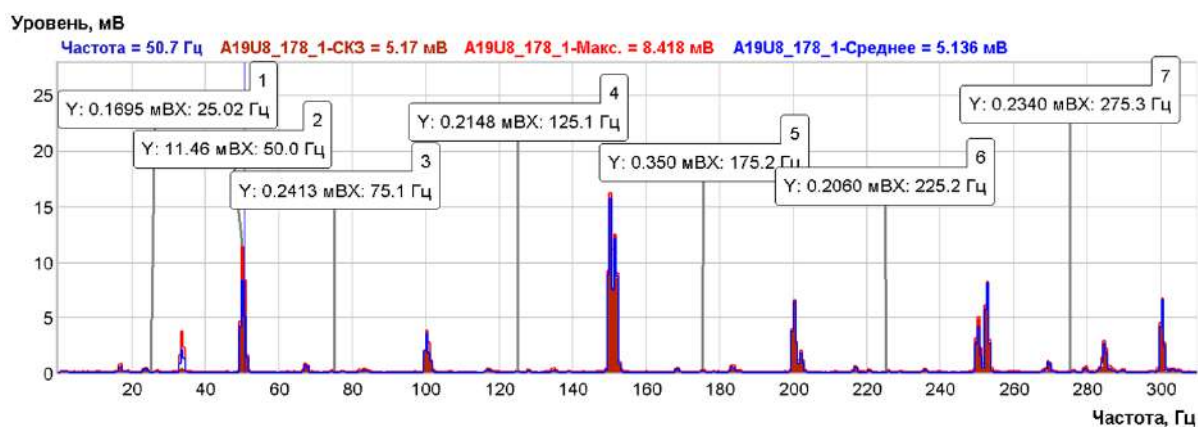


Рис. 7. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях: а — $l_x = 0$ м; б — $l_x = 0,25$ м; в — $l_x = 0,55$ м

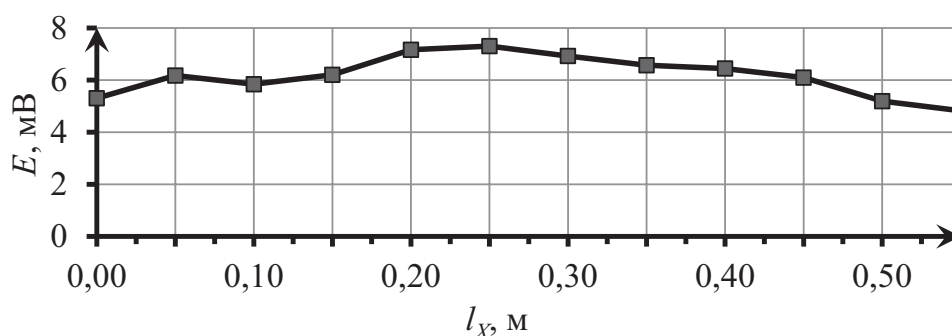


Рис. 8. График зависимости действующего значения ЭДС, наведенного в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от смещения l_x относительно оси пути

Полученные значения для различных частот помехи, соответствующих частотам несущего сигнала АЛС-АРС, сопоставимы с номинальным уровнем полезного сигнала.

Взаимное положение приемной катушки и асинхронного тягового двигателя существенно влияет на уровень помехи на входе приемника поездных устройств безопасности. При удалении приемной катушки от оси вращения асинхронного тягового двигателя наблюдается снижение уровня помехи на входе локомотивного приемника.

При низких частотах питающего тока в приемной катушке наводится значительная по уровню помеха во всем частотном спектре. Такой режим работы электродвигателя характерен при трогании с места и при подъезде к запрещающему сигналу светофора (точке прицельного торможения в конце маршрута/блок-участка для бессветофорных систем интервального регулирования) на малых скоростях.

Полученные экспериментальные данные соответствуют опубликованным ранее результатам исследований в данной области [14].

Заключение

В результате выполнения исследования экспериментально определены характери-

ки действующей в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитенах аддитивной электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода.

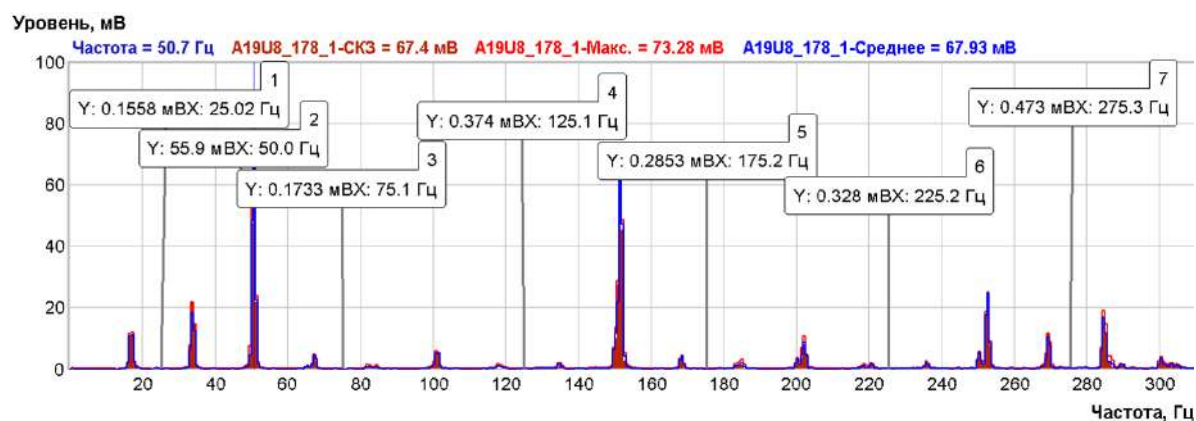
Получены следующие основные результаты:

1. На основе анализа научных исследований в области оценки влияния электромагнитной обстановки на работу поездных устройств АЛС-АРС была установлена необходимость оценки влияния внешнего электромагнитного поля асинхронного тягового двигателя на работу бортового оборудования АТДП.

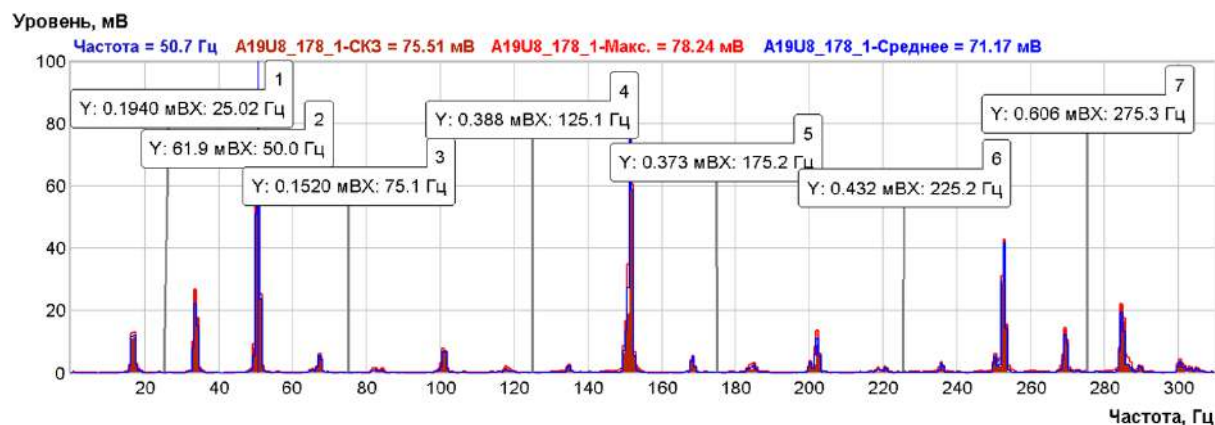
2. В результате проведенного экспериментального исследования было установлено, что действующие значения ЭДС-помехи для различных частот, соответствующих частотам несущего сигнала АЛС-АРС, оказываются сопоставимы с уровнем полезного сигнала.

3. Работа асинхронного тягового двигателя в режимах движения при трогании с места и при подъезде к точке прицельного торможения может являться причиной сбоя в работе поездных устройств АТДП ввиду формирования значительной по уровню помехи во всем частотном спектре.

а



б



в

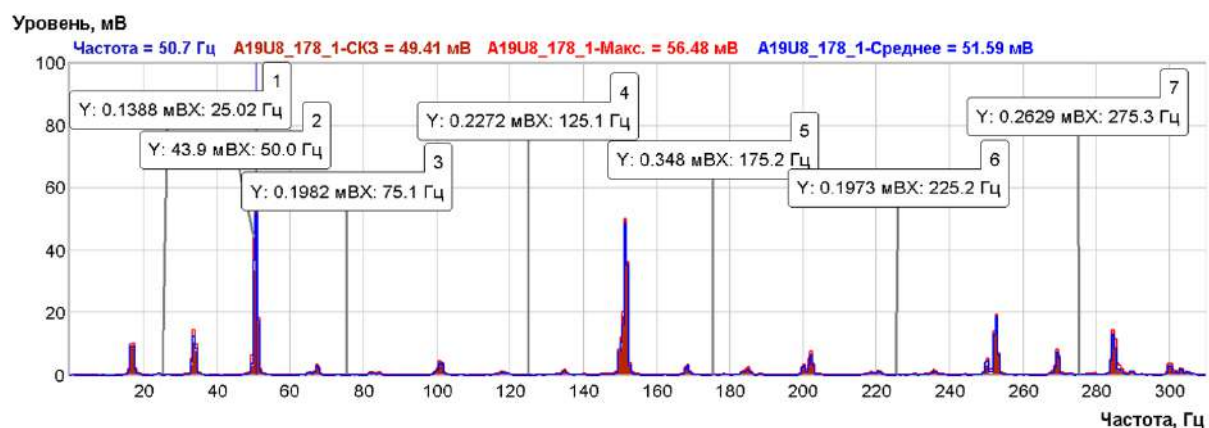


Рис. 9. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях: а — $h_{УГР} = 105$ мм; б — $h_{УГР} = 125$ мм; в — $h_{УГР} = 185$ мм

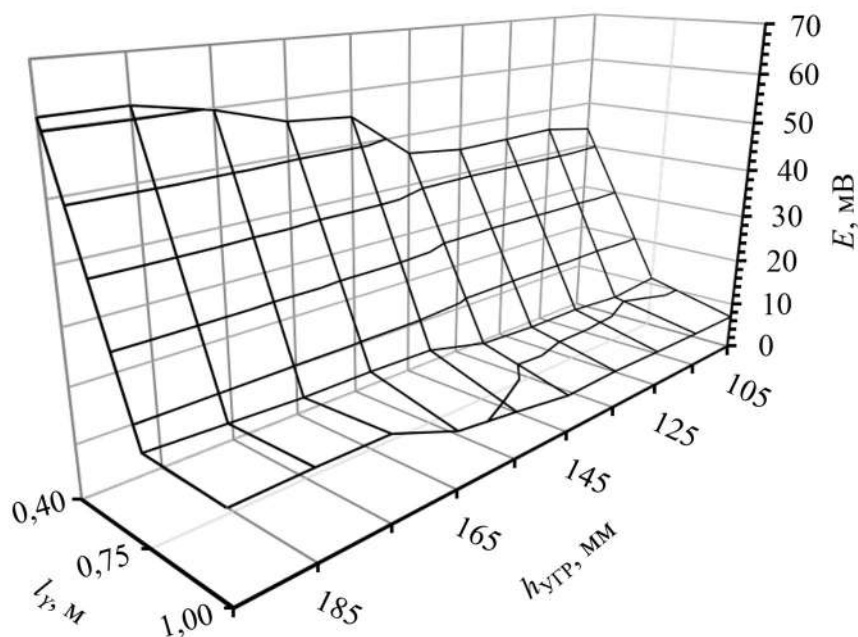


Рис. 10. График зависимости действующего значения ЭДС, наведенного в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от высоты $h_{угр}$ подвеса относительно уровня головки рельса и расстояния l_{γ} от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути

Полученные результаты уточняют описание характерной для условий эксплуатации АЛС-АРС электромагнитной обстановки на метрополитенах и будут использованы авторами в дальнейшем для совершенствования процесса сервисного сопровождения аппаратуры АТДП.

Список источников

1. Шевлюгин М. В., Данг В. Ф. Гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения метрополитена // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 6 (61). С. 88–101. EDN VONOSP
2. Кабецкий А. Г. Алгоритмы цифровой обработки сигналов при оценке влияния гармоник тягового тока подвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств ЖАТ на метрополитене // Цифровые инфокоммуникационные технологии: сборник научных трудов II Меж-

- дународной научно-практической конференции, посвященной 40-летию факультета «Информационные технологии управления» и 50-летию кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» (Ростов-на-Дону, 16 декабря 2022 года). Ростов н/Д.: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. С. 301–309. DOI: 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_301. EDN EIBVAI

3. Бестемьянов П. Ф., Горлин И. Г. Статистические модели амплитуды и длительности импульсных электромагнитных помех в каналах автоматики и телемеханики метрополитена // Электротехника. 2016. № 9. С. 3–7. EDN WXCUN

4. Нормы опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена / А. Д. Манаков [и др.] // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1, № 1. С. 28–39. EDN UHFZST

5. Повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена с использованием 12-пульсовых преобразовательных агрегатов / М. П. Бадер [и др.] // Практическая силовая электроника. 2016. № 2 (62). С. 38–43. EDN WEFHMJ
6. Оценка гармонических составляющих тягового тока в Московском метрополитене на основе экспериментальных замеров / Л. А. Баранов [и др.] // Наука и техника транспорта. 2016. № 2. С. 8–13. EDN WADHFN
7. Кабецкий А. Г. Метод оценки влияния гармоник тягового тока подвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на метрополитене // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения: сборник статей международной научно-теоретической конференции (Санкт-Петербург, Петергоф, 18 мая 2021 года). СПб.: Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений). 2021. С. 30–35. EDN WGXUIN.
8. Оценка энергии внешних электромагнитных помех частотно-регулируемых асинхронных двигателей / Ю. Б. Казаков [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 4. С. 37–43. EDN ZDOQQZ
9. Кабецкий А. Г. Обеспечение электромагнитной совместимости систем интервального регулирования движения поездов и подвижного состава с асинхронным тяговым двигателем на линиях Петербургского метрополитена // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения: сборник статей VII Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Петергоф, 21 мая 2024 года). СПб.: Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений). 2024. С. 191–203. EDN JDQIKZ
10. Recent Trends in Magnetic Sensors and Flux-Based Condition Monitoring of Electromagnetic Devices / V. Gurusamy [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 58, iss. 4. Pp. 4668–4684, July–Aug. 2022. DOI: 10.1109/TIA.2022.3174804
11. Research on Radiated Interference from Diesel Locomotive Traction Motor to Cab Signalling / C. Liu [et al.] // IET Electrical Systems in Transportation. 2022. Vol. 12, iss. 3. Pp. 181–196. DOI: 10.1109/MAPE.2017.8250849
12. Шаманов В. И. Индуктивная связь локомотивных катушек АЛСН с рельсовыми линиями // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 11. С. 2–5. EDN OKLIKВ
13. Бестемьянов П. Ф., Захаров Д. П. К исследованию тракта передачи сигналов с пути на локомотив // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 5. С. 5–10. EDN RNLZHB
14. Кузьмин В. С., Рядчиков Р. О. О влиянии внешних электромагнитных полей силового оборудования на работу локомотивных устройств безопасности // Наука и техника транспорта. 2025. № 1. С. 79–83. EDN UPJXAJ
- Дата поступления: 13.04.2026
Решение о публикации: 22.06.2026
- Контактная информация:**
РЯДЧИКОВ Руслан Олегович — аспирант;
ryadchikov.ro@yandex.ru
КУЗЬМИН Владислав Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент; vs.kuzmin@bk.ru
ЖУХИН Никита Олегович — кандидат техн. наук, доцент, зав. лабораторией; Rzd1997@mail.ru
ШВОЙН Андрей Иванович — аспирант;
shvoyn@mail.ru

Experimental Assessment of the Parameters of Electromagnetic Interference from an Asynchronous Traction Drive in the Communication Channel of Automatic Cab Signaling in the Metro System

R. O. Ryadchikov, V. S. Kuz'min, N. O. Zhuxin, A. I. Shvojn

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), 9 bldg., 9 Obraztsova str., GSP-4, Moscow, 127994, Russia

For citation: Ryadchikov R. O., Kuz'min V. S., Zhuxin N. O., Shvojn A. I. Experimental Assessment of the Parameters of Electromagnetic Interference from an Asynchronous Traction Drive in the Communication Channel of Automatic Cab Signaling in the Metro System // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 572–586. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-572-586 (In Russian)

Abstract

Objective: to experimentally determine the characteristics of the electromagnetic interference from external fields generated during the operation of an asynchronous traction drive acting in the inductive coupling channel of automatic cab signaling with automatic speed regulation on subways. Based on the obtained results, demonstrate the necessity of considering the influence of such interference on the operation of receivers as part of trainborne equipment when investigating cases of failures and malfunctions in the operation of train motion control automation and remote control systems. **Methods:** include analysis of scientific and technical literature dedicated to determining the parameters of the electromagnetic environment characteristic of the operating conditions of onboard automation and remote control equipment and generated during the operation of the asynchronous traction drive of electric rolling stock. The experimental study was conducted in the laboratories of the departments “Electric Trains and Locomotives” and “Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport” by setting current and supply frequency values in the stator windings using a frequency converter, changing the mutual arrangement of receiving coils relative to the asynchronous traction motor, and measuring the magnitude of the electromotive force (EMF) induced in the receiving coils using the ZETLAB ZET 017-U8 spectrum analyzer and the PINTEX DP-50 differential probe. Results processing was performed using known methods of mathematical statistics. **Results:** characteristic dependencies of the effective EMF value induced in the receiving coils of onboard safety equipment by the external electromagnetic field were constructed with changes in suspension height relative to the running rail head level, lateral displacements relative to the vertical axis of the running rail, and distance from the motor rotation axis. The spectral composition of the interference was determined. **Practical importance:** the obtained results refine the nature of the electromagnetic environment under operating conditions of automatic cab signaling with automatic speed regulation on subways, verify previously obtained results of computer modeling and developed mathematical models, and will be used in the future to improve service support for onboard equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, external electromagnetic field, metro system, onboard safety equipment, inductive communication channel, asynchronous traction drive

References

1. Shevlyugin M. V., Dang V. F. *Garmonicheskie pomekhi tyagovogo toka v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena* [Harmonic Interference of Traction Current in the Metro Power Supply System], *Mir transporta* [World of Transport], 2015, vol. 13, no. 6 (61), pp. 88–101. EDN VONOCF (In Russian)
2. Kabetskiy A. G. *Algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov pri otsenke vliyaniya garmonik tyagovogo toka podvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym*

privodom na rabotu ustroystv ZHAT na metropolitene [Algorithms for Digital Signal Processing in Assessing the Impact of Traction Current Harmonics from Rolling Stock with Asynchronous Traction Drive on the Operation of Railway Automation and Remote Control Devices in the Metro], *Tsifrovye infokommunikatsionnye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennaya 40-letiyu fakulteta "Informatsionnye tekhnologii upravleniya" i 50-letiyu kafedry "Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte"*, Rostov-na-Donu, 16 dekabrya 2022 goda [Digital Infocommunication Technologies: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 40th Anniversary of the Faculty of Information Technologies in Management and the 50th Anniversary of the Department of Automation and Telemechanics in Railway Transport, Rostov-on-Don, December 16, 2022], Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2022, pp. 301–309. DOI: 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_301. EDN EIBVAI (In Russian)

3. Bestemyanov P. F., Gorlin I. G. Statisticheskie modeli amplitudy i dlitelnosti impulsnykh elektromagnitnykh pomekh v kanalakh avtomatiki i telemekhaniki metropolitena [Statistical Models of Amplitude and Duration of Pulse Electromagnetic Interference in Metro Automation and Telemechanics Channels], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2016, no. 9, pp. 3–7. EDN WXCUEU (In Russian)

4. Manakov A. D., et al. Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya pomekh na ustroystva ALS-ARS sistemy BARS Peterburgskogo metropolitena [Standards for Hazardous and Interfering Effects of Interference on ALS-ARS Devices of the BARS System of the St. Petersburg Metro], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 28–39. EDN UHFZST (In Russian)

5. Bader M. P., et al. Povyshenie kachestva elektricheskoy energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya metropolitena s ispolzovaniem

12-pulsovykh preobrazovatelnykh agregatov [Improving the Quality of Electrical Energy in the Metro Traction Power Supply System Using 12-Pulse Converter Units], *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2016, no. 2 (62), pp. 38–43. EDN WEFHMJ (In Russian)

6. Baranov L. A., et al. Otsenka garmonicheskikh sostavlyayushchikh tyagovogo toka v Moskovskom metropolitene na osnove eksperimentalnykh zamerov [Assessment of Harmonic Components of Traction Current in the Moscow Metro Based on Experimental Measurements], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Transport Technology]*, 2016, no. 2, pp. 8–13. EDN WADHFH (In Russian)

7. Kabetskiy A. G. Metod otsenki vliyaniya garmonik tyagovogo toka podvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom na rabotu ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na metropolitene [Method for Assessing the Impact of Traction Current Harmonics from Rolling Stock with Asynchronous Traction Drive on the Operation of Railway Automation and Telemechanics Devices in the Metro], *Innovatsionnaya zheleznaya doroga. Noveyshie i perspektivnye sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov. Problemy i resheniya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, Peterhof, 18 maya 2021 goda [Innovative Railway. Latest and Prospective Train Control Systems. Problems and Solutions: Proceedings of the International Scientific and Theoretical Conference, St. Petersburg, Peterhof, May 18, 2021]*, St. Petersburg, Military Institute (Railway Troops and Military Communications), 2021, pp. 30–35. EDN WGXUIH (In Russian)

8. Kazakov Yu. B., et al. Otsenka energii vneshnikh elektromagnitnykh pomekh chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh dvigateley [Assessment of the Energy of External Electromagnetic Interference in Frequency-Controlled Asynchronous Motors], *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Ivanovo State Power*

University], 2017, no. 4, pp. 37–43. EDN ZDOQQZ (In Russian)

9. Kabetskiy A. G. Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti sistem intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov i podvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym dvigatelem na liniyakh Peterburgskogo metropolitena [Ensuring Electromagnetic Compatibility of Train Interval Control Systems and Rolling Stock with Asynchronous Traction Motors on the Lines of the St. Petersburg Metro], *Innovatsionnaya zheleznaya doroga. Noveyshie i perspektivnye sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov. Problemy i resheniya: sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, Petergof, 21 maya 2024 goda [Innovative Railway]*, St. Petersburg, Military Institute (Railway Troops and Military Communications), 2024, pp. 191–203. EDN JDQIKZ (In Russian)

10. Gurusamy V., et al. Recent Trends in Magnetic Sensors and Flux-Based Condition Monitoring of Electromagnetic Devices, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, iss. 4, pp. 4668–4684, July–August, 2022. DOI: 10.1109/TIA.2022.3174804.

11. Liu C., et al. Research on Radiated Interference from Diesel Locomotive Traction Motor to Cab Signalling, 2022, vol. 12, iss. 3, pp. 181–196. DOI: 10.1109/MAPE.2017.8250849.

12. Shamanov V. I. Induktivnaya svyaz' lokomotivnykh katushek ALSN s rel'sovymi liniyami [Inductive Coupling of Locomotive ALSN Coils with Track Circuits], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation,*

Communication, Informatics], 2011, no. 11, pp. 2–5. EDN OKLIK. (In Russian)

13. Bestemyanov P. F., Zakharov D. P. K issledovaniyu trakta peredachi signalov s puti na lokomotiv [On the Study of the Signal Transmission Path from Track to Locomotive], *Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Electronics and Electrical Equipment of Transport]*, 2013, no. 5, pp. 5–10. EDN RNLZHB (In Russian)

14. Kuzmin V. S., Ryadchikov R. O. O vliyani vneshnikh elektromagnitnykh poley silovogo oborudovaniya na rabotu lokomotivnykh ustroystv bezopasnosti [On the Influence of External Electromagnetic Fields from Power Equipment on the Operation of Locomotive Safety Devices], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Transport Technology]*, 2025, no. 1, pp. 79–83. EDN UPJXAJ (In Russian)

Received: April 13, 2026

Accepted: June 22, 2026

Author's information:

Ruslan O. RYADCHIKOV — Postgraduate Student; ryadchikov.ro@yandex.ru

Vladislav S. KUZ'MIN — PhD in Engineering, Associate Professor; vs.kuzmin@bk.ru

Nikita O. ZHUXIN — PhD in Engineering, Assistant, Head of Laboratory; rzd1997@mail.ru

Andrej I. SHVOJN — Postgraduate Student; shvoyn@mail.ru

УДК 691.168

Анализ возможности использования нефтяных асфальтитов в производстве углеродных волокон для модификации дорожных покрытий

Ю. И. Макаров¹, К. Ф. Исламов²

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

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета (КФУ), Россия, 423800, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 13

Для цитирования: Макаров Ю. И., Исламов К. Ф. Анализ возможности использования нефтяных асфальтитов в производстве углеродных волокон для модификации дорожных покрытий // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 587–595. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-587-595

Аннотация

В статье рассмотрены асфальтиты как природного происхождения, так и возникающие при переработке нефти, которые в настоящее время используются в различных отраслях благодаря уникальным свойствам: термопластичности, высокой удельной поверхности, наличию полярных групп и способности стабилизировать другие системы. **Цель:** рассмотреть возможность использования асфальтитов в производстве углеродных волокон, которые могут применяться как дисперсно-армирующие добавки, улучшающие физико-механические свойства асфальтобетонов. **Методы:** в работе использованы методы денсиметрического, микроскопического, а также группового химического и элементного анализа. **Результаты:** проведен сравнительный анализ физико-механических свойств и химического состава природного и нефтяного асфальтитов. Представлены графики зависимостей: температуры размягчения асфальтита — от условий деасфальтизации, выхода асфальтита — от температуры процесса, температуры размягчения пека — от температуры и продолжительности термообработки. **Практическая значимость:** асфальтиты используются в модификации битумных вяжущих, буровых растворах, производстве клеев, теплоизоляции и во многих других производствах, а также представляют интерес для получения углеродных материалов как модифицирующих добавок в асфальтобетонах.

Ключевые слова: асфальтиты, асфальтены, углеродные волокна, асфальтобетоны, дисперсно-армирующая структура

Введение

Асфальтиты как одна из производных нефти встречаются в виде пластовых и жилообразных залежей в ряде месторождений России и используются в производстве строительных изделий, таких как лаки, клеи, теплоизоляционные материалы и др.

В настоящее время способы углубленной переработки нефтяного сырья, включая тяже-

лые остатки, хорошо освещены в отечественной литературе. Один из них был разработан в конце прошлого века Башкирским научно-исследовательским институтом по переработке нефти — это процесс Добен [1, 2], позволяющий достаточно четко выделить асфальто-смолистые вещества из нефтяных остатков.

Основным назначением этого процесса являются выделение деасфальтизата и его

дальнейшая гидрогенизационная переработка с целью получения моторных или котельных топлив. В качестве растворителя при деасфальтизации применяется легкий бензин (начало кипения 20–24 °С, конец кипения 60–62 °С). В зависимости от качества нефтяных остатков объемная кратность разбавления бензином составляет от 3 до 5. Процесс проводится при температуре 140 °С и давлении 1,95–2,45 МПа. При этом извлекаются тяжелые асфальто-смолистые вещества в виде асфальтенового концентрата, содержащего в своем составе до 70–85 % асфальтенов и 15–30 % адсорбированного на асфальтенах масла и смол.

Кроме того, вместе с асфальтеновым концентратом удаляется значительная часть золотобразующих металлов, содержащихся в составе исходного сырья. Поэтому асфальтиты, выделенные из тяжелых остатков переработки нефти, по сравнению с природными характеризуются повышенной плотностью, значительным содержанием золы, кислородных и азотистых соединений. Можно выделить следующие основные свойства нефтяных асфальтитов:

1. Объемная масса не выше 750 кг/м³.
2. Гранулометрический состав:
 - фракция < 1,0 мм не менее 75 %;
 - фракция > 2,8 мм не более 1,0 %;
 - зола до 5,0 %.
3. Растворимость в бензоле не менее 80 %.
4. Остаточное содержание бензина-растворителя не более 0,1 %.

В связи с этим выявлен ряд направлений применения нефтяных асфальтитов в разных отраслях производства.

Благодаря тому, что они используются в порошкообразном виде с различной температурой размягчения и меньшим содержанием нерастворимых примесей, получаемые из них строительные материалы характеризуются

улучшенными качественными и эксплуатационными показателями по сравнению с материалами, изготовленными на основе природных асфальтитов. Производство и потребление нефтяных асфальтитов выгодно тем, что их качество может регулироваться в процессе выпуска в зависимости от назначения. Этому посвящены работы как отечественных [3–5], так и зарубежных [6–9] исследователей. Кроме того, нефтяные асфальтиты по сравнению с природными имеют повышенную гидрофобность, высокое электрическое сопротивление и сравнительно низкий коэффициент теплопроводности. В силу указанных качеств они пригодны для широкого применения в строительной и дорожной индустрии.

Цель работы — рассмотреть возможность использования асфальтитов в производстве углеродных волокон, которые могут использоваться как дисперсно-армирующие добавки, улучшающие физико-механические свойства асфальтобетонов. Вопрос использования углеродных нанотрубок освещен в работах [10, 11], а также представлен в аналитическом исследовании А. А. Игнатьева [12] по обзору литературы о добавках в асфальтобетон. Способ изготовления битумного вяжущего на основе полимеров отражен в работе [13].

Сами по себе природные асфальтиты не превращают в углеродные волокна напрямую — в них слишком много примесей (сера, зола, разные минералы), которые испортят весь процесс. Но асфальтиты (или выделенные из них асфальтены) используют как *сырье* для получения прекурсоров — например, смесей с полиакрилонитрилом (ПАН-асфальт), которые затем уже перерабатывают в углеродные волокна. То есть асфальт здесь — не конечный армирующий агент, а строительный блок для классического углеродного волокна.

Методы и материалы

В качестве материалов использовались природные асфальтиты месторождения S, а также асфальтиты из остаточных продуктов первичной переработки нефти месторождений K и N (таблица).

Нефтяные асфальтиты являются одним из перспективных видов сырья для производства углеродных волокон — весьма ценного композиционного строительного материала. Так, углеродные материалы, полученные на основе асфальтитов-пеков, используются в качестве теплоизоляционного покрытия в вакуумных печах, работающих при высоких температурах, как наполнители термостойких пластмасс для улучшения механических и термических свойств, которые применяются

при изготовлении коррозионно-термостойких фильтровальных тканей, в производстве автомобильных покрышек, специальных электропроводов, кабелей и т. д.

Исходя из вышеизложенного, представляет интерес расширение выпуска углеродных волокон на основе нефтяного сырья, например для улучшения свойств асфальтобетонов.

В работе использованы методы денситрического, микроскопического, а также группового химического и элементного анализа.

Результаты

Асфальтит представляет собой концентрат асфальтенов (до 75%) в смеси с тяжелыми ароматическими углеводородами (до 10%) и смолами (до 12%). Это обуславливает

ТАБЛИЦА. Характеристика образцов природного (1) и нефтяного (2) асфальтитов

Показатели	1	2	
		А	Б
Плотность, кг/м ³	1020–1160	1110–1130	1095
Температура размягчения по КиШ, °С	170–220	150–180	132,5
Молекулярная масса, а. е. м.	1460	1400	1250
Групповой хим. состав, %:			
• масла (с ароматикой)	12,7–15,0	15,4–18,0	17,0
• смолы	21,1–27,3	10,0–12,0	13,0
• асфальтены	59,6–63,5	63,0–70,0	70,0
Элементный состав, %:			
• углерод	77,8–81,3	83,3–85,0	7,0
• водород	7,9–8,2	8,3–8,7	8,0
• сера	7,0–7,7	4,7–6,1	3,0
• азот	2,1–2,0	0,7–0,8	1,1
• кислород	0,5–0,6	0,17–1,5	0,9
Зольность, %	0,8–1,2	0,3–1,3	0,2
Содержание воды, %	до 30	отсутствует	
Содержание, 10 ⁻⁴ %:			
• ванадия	3500	—	700
• никеля	585	—	70

его сравнительно высокую плотность (1170–1180 кг/м³) и коксуюемость (45,6–50,5%).

Групповой химический состав асфальтита и, следовательно, его физико-химические свойства зависят от параметров режима процесса деасфальтизации [14]. Так, замечено, что температура размягчения асфальтита существенно возрастает с увеличением кратности разбавления и повышением температуры деасфальтизации (рис. 1), которая зависит от изменения содержания углеводородов и смол (рис. 2).

Следует также отметить, что асфальтит из дистиллятного крекинг-остатка отличается

от асфальтита, выделенного из остатков прямой перегонки нефти, более низкой температурой размягчения (на 34–76 °С), хотя они практически не различаются по содержанию асфальтенов. Это объясняется более низкой молекулярной массой групповых компонентов асфальтита, выделенного из крекинг-остатка, составляющей 700–800 а.е.м. (вместо 1200–1400 у прямогонных асфальтитов).

Исходя из вышеизложенного и учитывая высокое содержание асфальтитов в крекинг-остатках, в дальнейшем была исследована возможность использования асфальтита в качестве сырья для получения углеродных волокон.

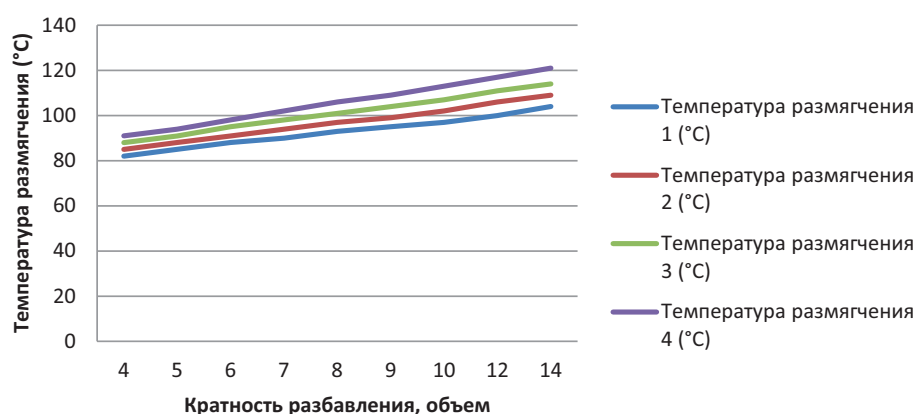


Рис. 1. Изменение температуры размягчения асфальтита в зависимости от условий деасфальтизации

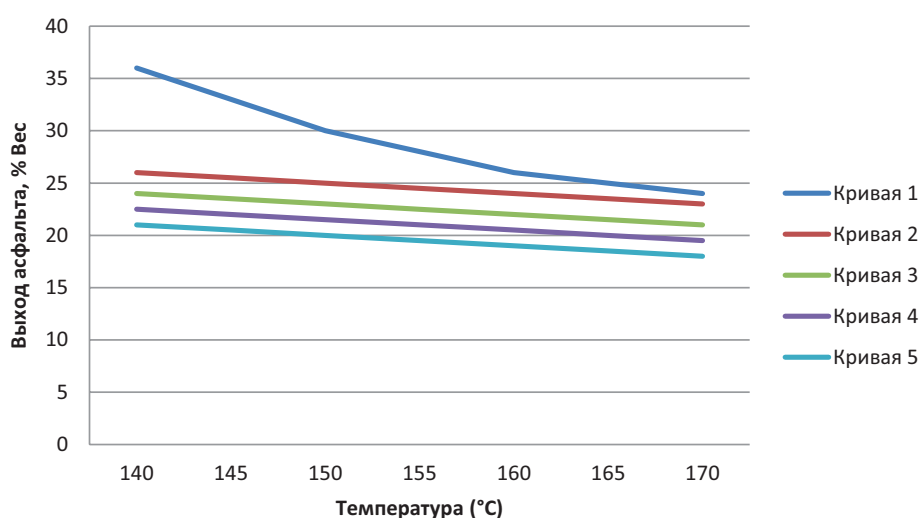


Рис. 2. Изменение выхода асфальтита в зависимости от температуры процесса

Углеродные волокна, полученные на основе асфальтитов, имеют достаточную для использования их в качестве подложки в производстве жаростойких нитей прочность на разрыв (450–500 МПа). Однако существенным недостатком исследованных образцов асфальтитов является то, что в вышеуказанных условиях получают углеродные волокна, спекшиеся на отдельных участках с образованием точечного контакта, что обуславливает большую обрывность моноволокон. Причиной спекания отдельных волокон также является наличие в пеке низкомолекулярных компонентов. Однако такие волокна представляют большой интерес при производстве углеродных нитей.

Указанные выше отрицательные явления в принципе могут быть устранены подбором соответствующих условий формования и других стадий (резкое снижение скорости подъема температуры при отверждении и карбонизации). Но при этом увеличивается продолжительность процесса. Следует указать и на сравнительно низкий выход углеродного волокна из асфаль-

тита (60–65 %), что также является следствием содержания в нем значительного количества низкомолекулярных веществ, которые на стадии карбонизации уходят из волокна в виде газов и паров.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в физико-химической обработке асфальтитов, направленной на удаление или вовлечение в реакцию поликонденсации низкомолекулярных компонентов с получением более высокоплавкого продукта (пека), обладающего лучшими волокнообразующими свойствами.

С этой целью в дальнейшем образцы асфальтитов были подвергнуты термообработке при температурах 250–300 °С и остаточном давлении $1,33 \cdot 10^8$ МПа на кубовой лабораторной установке. В указанных условиях протекают процессы испарения низкомолекулярных соединений и поликонденсации компонентов асфальтита, что в конечном итоге приводит к образованию более высокомолекулярного продукта — пека. Сказанное наглядно иллюстрируется на рис. 3.

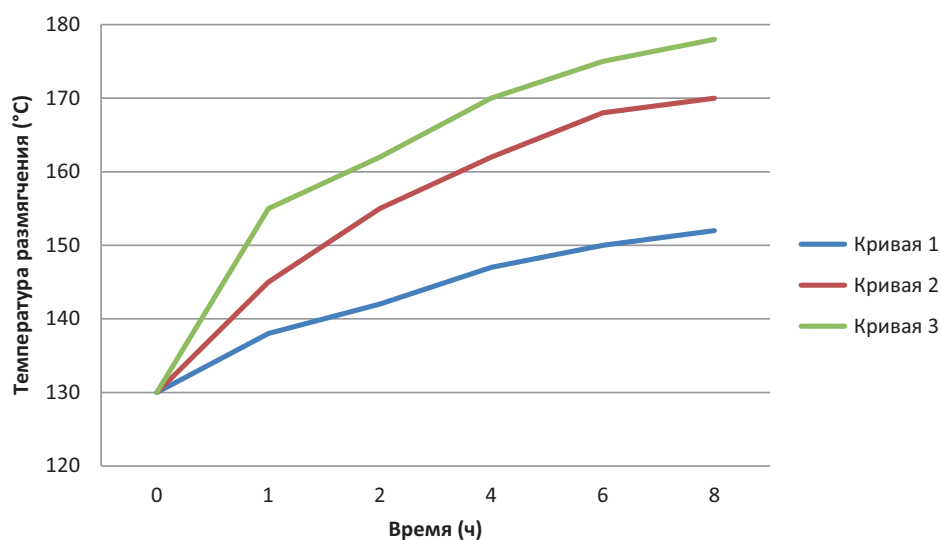


Рис. 3. Изменение температуры размягчения пека в зависимости от температуры и продолжительности термообработки

Дискуссия

На основании выполненных экспериментов были выбраны оптимальные условия деасфальтизации дистиллятного крекинг-остатка и термообработки асфальтита. Термообработка заметно снижает в асфальтите содержание средних и тяжелых ароматических углеводородов, что приводит к образованию карбенов и карбоидов, возрастанию плотности, молекулярной массы и содержания углерода.

Таким образом, исследованиями процесса термообработки асфальтитов показана возможность регулирования их качества в довольно широких пределах, а следовательно, вероятность подбора оптимального режима с точки зрения получения пригодного для производства углеродных волокон.

Технология получения углеродных волокон из расплавов сырья предусматривает обязательное применение фильтрации как при получении пека, так и при его использовании в производстве волокон. Фильтрация проводится с целью удаления из пека неплавких в условиях прядения компонентов (карбоидов, минеральных примесей и т. д.).

В результате исследований выбраны условия фильтрации высокоплавкого пека на основе асфальтита из дистиллятного крекинг-остатка (температура фильтрации 300 °С, кратность разбавления растворителем 4:1). В качестве фильтрующего материала использованы рукавные фильтры из полиимида. Микроскопическим анализом осадка получены данные по распределению частиц по размерам. В фильтрате отсутствовали частицы размером более 1 мк. Удалением растворителя из фильтрата (перегонкой при температуре порядка 380 °С и остаточном давлении $1,33 \cdot 10^8$ МПа в течение 6 часов) получен пек с улучшенными по сравнению с исходными качествами.

Организация производства высокоплавких пеков и углеродных волокон на основе асфальтитов, выделенных из тяжелых нефтяных остаточных продуктов, имеет большое значение. Техническая возможность и экономическая целесообразность использования нефтяных асфальтитов в строительной индустрии требует дальнейших исследований, так как широкое использование асфальтитов для этих целей сдерживается в основном из-за ограниченности объема их выпуска.

Заключение

Если рассматривать углеродные волокна в асфальтобетонах в качестве дисперсно-армирующих добавок, то можно отметить, что именно они признаны передовыми и перспективными материалами [15].

Углеродные волокна из асфальтитов в асфальтобетонной смеси образуют композит: битумная матрица плюс углеродные волокна — арматура. Волокна работают как каркас, улучшая прочность на растяжение и изгиб. Особенно ценно, что эффект заметен и при отрицательных температурах [16].

Стоит предположить с целью дальнейших исследований, что может повышаться водостойкость, теплостойкость, расширяться температурный диапазон укладки. К тому же углеродные материалы (волокна, нанотрубки) могут участвовать в системах самовосстановления: при локальном нагреве (например, микроволновым излучением) они помогают «залечить» микротрещины.

В целом можно отметить, что проведенные исследования — направление перспективное: оно позволяет утилизировать тяжелое нефтяное сырье и создавать более долговечные дорожные покрытия.

Однако следует учитывать, что от исходного состава асфальтитов (содержания серы,

металлов) зависит итоговая пригодность сырья для получения качественного прекурсора, а перед масштабным внедрением нужны дополнительные исследования, например, как разные типы асфальтитов влияют на совместимость с битумной матрицей.

Список источников

1. Использование продуктов процесса Добен / В. В. Фрязинов [и др.] // Труды БашНИПИнефть, 1972. Вып. 10. С. 45–50.
2. Деасфальтизация тяжелых остатков бензином / А. С. Эйгенсон [и др.] // Труды БашНИПИнефть, 1972. Вып. 10. С. 55–60.
3. Структура асфальтенов каменноугольного пека / С. А. Созинов [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 6. С. 603–608.
4. Каширцев В. А. Углеводороды, окклюдируемые асфальтенами // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1211–1219.
5. Еременко А. Е. Разработка технологии переработки вторичных тяжелых нефтяных остатков для производства пеков: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2025. 157 с.
6. Amara B., Kocaefe D., Kocaefe Y. A Review of the Studies on the Utilization of Petroleum Pitch and Its Blends with Coal Tar Pitch for Carbon Anode Production in Aluminum Industry // Next Research. 2025. Pp. 100–250.
7. Osborn J. D. Port Bolivar Pavement Material: U.S. Patent No. 6 346 561 B1. Publ. 12 Feb. 2002.
8. Ostermeyer L. F. Engineered Modified Asphalt Cement: U.S. Patent No. 5 221 703. Priority 14 May 1992, publ. 22 June 1993.
9. Composition Comprising a Concentrate of Natural Asphaltene in Fluxing Oil Suitable for Use in Preparing Asphalt Blends. Patent WO 2020/023 885 / Assignee unknown. Int. Filed 26 July 2019, publ. 30 Jan. 2020.
10. Ahmad M., Al-Dala'ien R., Beddu S., Itam Z. Thermo-Physical Properties of Graphite Powder and Polyethylene Modified Asphalt Concrete // Engineered Science. 2021. DOI: 10.30919/es8d569
11. Investigation of the Effect of Induction Heating on Asphalt Binder Aging in Steel Fibers Modified Asphalt Concrete / H. Li [et al.] // Materials. 2019. Vol. 12. Art. № 1067. DOI: 10.3390/ma12071067
12. Игнатьев А. А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия КГАСУ. 2023. № 1 (63). С. 14–30.
13. Мурузина Е. В., Ахметов Ф. М., Казанская Л. Ф. Разработка способа изготовления модифицированного битумно-полимерного вяжущего // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 190–197. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-190-197
14. Современные методы определения группового состава среднестиллятных нефтяных фракций / Э. С. Демиденко [и др.] // НефтеГазХимия. 2024. № 2. С. 44–52
15. Кенжегалиева А., Жамболова А., Онгарбаев Е. Модификация битумов и асфальтобетонов углеродными наноматериалами: краткий обзор // Горение и плазмохимия. 2024. № 22 (2). С. 109–122. DOI: 10.18321/cpc22(2)109-122
16. Шеховцева С. Ю., Высоцкая М. А. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на температурный интервал работоспособности полимерно-битумных вяжущих и асфальтобетонов на их основе // Известия КГАСУ. 2017. № 4 (42). С. 335–342.

Дата поступления: 03.07.2026

Решение о публикации: 08.08.2026

Контактная информация:

МАКАРОВ Юрий Иванович — старший преподаватель; makarov@pgups.ru

ИСЛАМОВ Камиль Фаритович — кандидат техн. наук, доцент; kam@kambox.ru

Analysis of the Possibility of Using Petroleum Asphaltites in the Production of Carbon Fibers for Modification of Road Surfaces

Yu. I. Makarov¹, K. F. Islamov²

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

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University, 13 Mira ave., Naberezhnye Chelny, 423800, Russia

For citation: Makarov Yu. I., Islamov K. F. Analysis of the Possibility of Using Petroleum Asphaltites in the Production of Carbon Fibers for Modification of Road Surfaces // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 587–595. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-587-595 (In Russian)

Abstract

The article discusses asphalts of both natural origin and those produced during oil refining, which are currently used in various industries due to their unique properties: thermoplasticity, high specific surface area, the presence of polar groups, and the ability to stabilize other systems. **Objective:** to explore the potential use of asphalts in the production of carbon fibers, which can be used as dispersed reinforcement additives that improve the physical and mechanical properties of asphalt concrete. **Methods:** the study employs densimetric, microscopic, and group chemical and elemental analysis methods. **Results:** a comparative analysis of the physical and mechanical properties and chemical composition of natural and petroleum asphalt samples was performed. Graphs were presented showing the changes in the softening temperature of asphalt depending on the deasphaltization conditions, the changes in the yield of asphalt depending on the process temperature, and the changes in the softening temperature of pitch depending on the temperature and duration of heat treatment. **Practical significance:** asphaltites are used in the modification of bituminous binders, drilling fluids, the production of adhesives, thermal insulation, and many other industries, and are also of interest for obtaining carbon materials as modifying additives in asphalt concretes.

Keywords: asphaltites, asphaltenes, carbon fibers, asphalt concretes, dispersed-reinforcing structure

References

1. Fryazinov V. V., et al. Ispolzovanie produktov processa Doben [Use of Doben Process Products], *Trudy BashNIPIneft [Proceedings of BashNIPIneft]*, 1972, iss. 10, pp. 45–50. (In Russian)
2. Eygenson A. S., et al. Deasfaltizaciya tyazhelyh ostatkov benzinom [Deasphalting of Heavy Residues with Gasoline], *Trudy BashNIPIneft [Proceedings of BashNIPIneft]*, 1972, iss. 10, pp. 55–60. (In Russian)
3. Sozinov S. A., et al. Struktura asfaltenov kamennougolnogo peka [Structure of Coal Tar Pitch Asphaltenes], *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya [Chemistry for Sustainable Development]*, 2018, vol. 26, no. 6, pp. 603–608. (In Russian)
4. Kashirtsev V. A. Uglevodorody, okklyudirovannye asfaltenami [Hydrocarbons Occluded by Asphaltenes], *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 1211–1219. (In Russian)
5. Eremenko A. E. Razrabotka tekhnologii pererabotki vtorichnyh tyazhelyh neftyanyh ostatkov dlya proizvodstva pekov: dissertaciya kandidata tekhnicheskikh nauk [Development of a Technology for Processing Secondary Heavy Oil Residues for Pitch Production: Candidate of Technical Sciences Diss.], Ufa, 2025, 157 p. (In Russian)

6. Amara B., Kocaefe D., Kocaefe Y. A Review of the Studies on the Utilization of Petroleum Pitch and Its Blends with Coal Tar Pitch for Carbon Anode Production in Aluminum Industry, 2025, pp. 100–250.
7. Osborn J. D. Port Bolivar Pavement Material: U.S. Patent no. 6 346 561 B1, published February 12, 2002.
8. Ostermeyer L. F. Engineered Modified Asphalt Cement: U.S. Patent no. 5 221 703, priority May 14, 1992, published June 22, 1993.
9. Composition Comprising a Concentrate of Natural Asphaltene in Fluxing Oil Suitable for Use in Preparing Asphalt Blends. Patent WO 2020/023 885, assignee unknown, international application filed July 26, 2019, published January 30, 2020.
10. Ahmad M., Al-Dala'ien R., Beddu S., Itam Z. Thermo-Physical Properties of Graphite Powder and Polyethylene Modified Asphalt Concrete, Engineered Science, 2021. DOI: 10.30919/es8d569
11. Li H., et al. Investigation of the Effect of Induction Heating on Asphalt Binder Aging in Steel Fibers Modified Asphalt Concrete, *Materials*, 2019, vol. 12, art. no. 1067. DOI: 10.3390/ma12071067
12. Ignatiev A. A. Dobavki v asfaltobeton. Obzor literatury [Additives in Asphalt Concrete. Literature Review], *Izvestiya KGASU [Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering]*, 2023, no. 1 (63), pp. 14–30. (In Russian)
13. Muruzina E. V., Akhmetov F. M., Kazanskaya L. F. Razrabotka sposoba izgotovleniya modifitsirovannogo bitumno-polimernogo vyazhushchego [Development of a Method for Manufacturing Modified Bitumen-Polymer Binder], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, St. Petersburg, Petersburg State Transport University (PGUPS) Publishers, 2026, vol. 23, iss. 1, pp. 190–197. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-190-197 (In Russian)
14. Demidenko E. S., et al. Sovremennye metody opredeleniya gruppovogo sostava srednedistillyatnykh neftnykh fraktsiy [Modern Methods for Determining the Group Composition of Middle Distillate Oil Fractions], *NefteGazoHimiya [Oil and Gas Chemistry]*, 2024, no. 2, pp. 44–52. (In Russian)
15. Kenzhegalieva A., Zhambolova A., Ongarbaev E. Modifikatsiya bitumov i asfaltobetonov uglerodnymi nanomaterialami: kratkiy obzor [Modification of Bitumens and Asphalts with Carbon Nanomaterials: A Brief Review], *Gorenie i Plazmohimiya [Combustion and Plasma Chemistry]*, 2024, no. 22 (2), pp. 109–122. DOI: 10.18321/cpc22(2)109-122 (In Russian)
16. Shekhovtseva S. Yu., Vysotskaya M. A. Vliyaniye odnostennykh uglerodnkh nanotrubok na temperaturnyy interval rabotosposobnosti polimerno-bitumnykh vyazhushchih i asfaltobetonov na ih osnove [Influence of Single-Walled Carbon Nanotubes on the Temperature Range of Performance of Polymer-Bitumen Binders and Asphalt Concrete Based on Them], *Izvestiya KGASU [Proceedings of Kazan State University of Architecture and Engineering]*, 2017, no. 4 (42), pp. 335–342. (In Russian)

Received: July 03, 2026

Accepted: August 08, 2026

Author's information:

Yurij I. MAKAROV — Lecturer; makarov@pgups.ru
Kamil' F. ISLAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; kam@kambox.ru

УДК 681.518:621.313.333

Исследование особенностей нейрорегулирования асинхронным двигателем с обучением в цифровом двойнике

А. Н. Марикин, А. М. Евстафьев, В. Г. Жемчугов, А. Д. Онофрийчук

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

Для цитирования: Марикин А. Н., Евстафьев А. М., Жемчугов В. Г., Онофрийчук А. Д. Исследование особенностей нейрорегулирования асинхронным двигателем с обучением в цифровом двойнике // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 596–603. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-596-603

Аннотация

Цель: исследование возможности прямого нейросетевого управления асинхронным электроприводом без предварительного задания полной математической модели двигателя и оценка влияния предлагаемого способа управления на потребляемую мощность при сохранении качества регулирования скорости на уровне, сопоставимом с классическим FOC. **Методы:** исследование выполнено на модели системы «инвертор — асинхронный двигатель — регулятор» в среде цифрового двойника. RL-агент обучали формировать управляющие воздействия в d-q-координатах, после чего результаты сопоставляли с FOC по среднеквадратичному току статора, активной мощности и ошибке регулирования скорости. **Практическая значимость:** полученная политика может быть перенесена на встроенную платформу управления электроприводом. Такой подход уменьшает зависимость качества регулирования от точности параметрической идентификации двигателя и поэтому представляет интерес для разработки энергоэффективных приводных систем.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электропривод, обучение с подкреплением, цифровой двойник, нейросетевое управление, векторное управление

Для асинхронного электропривода сохраняет актуальность задача одновременного обеспечения точного регулирования скорости, приемлемых динамических свойств и умеренного энергопотребления. На практике она, как правило, решается средствами векторного управления. Однако качество настройки FOC (Field-Oriented Control) в заметной степени зависит от параметров двигателя и условий его работы, поэтому при их изменении требуется дополнительная корректировка регуляторов [1, 2].

В связи с этим представляет интерес схема, в которой закон управления не задается заранее структурой регуляторов, а формируется в процессе обучения агента при взаимодействии

с моделью привода. В такой постановке методы обучения с подкреплением позволяют искать управляющие воздействия по критерию, одновременно учитывающему ошибку регулирования и энергетические показатели [3, 4].

Научная новизна рассматриваемого решения связана с тем, что в структуре MIC (Motor Intelligent Control) RL-агент формирует воздействия на инвертор непосредственно в d-q-координатах без использования стандартного каскада PI-регуляторов по току. Обучение проводится в среде цифрового двойника, что позволяет без риска выполнять большое число эпизодов и подбирать стратегию по заданному критерию качества. После обучения политика

упрощается для последующей реализации на встроенной платформе. Тем самым в одной схеме сочетаются обучение в модели, прямое управление приводом и перенос полученной политики на микроконтроллер.

Применение алгоритмов обучения с подкреплением непосредственно для управления асинхронным электродвигателем — относительно новый шаг в силовой электронике и электроприводах. В традиционных системах управления, чтобы учесть нелинейности и неопределенности, часто используют сложные наблюдатели или адаптивные контуры. Смежный подход DeepMPC использует обучаемую модель динамики в предиктивном контуре [5]. Агент обучается правильным действиям методом проб и ошибок, получая вознаграждение за достижение целей управления [4]. Это устраняет необходимость настройки регуляторов на основе модели и повышает динамическую адаптивность к изменяющимся условиям.

Цель работы состоит в оценке возможности обеспечения прямого нейросетевого управления асинхронным электроприводом для снижения потребления активной мощности по

сравнению с FOC без заметного ухудшения качества регулирования скорости. Для этого RL-агент обучали в среде цифрового двойника, после чего анализировали устойчивость сформированной стратегии в типовых режимах и сопоставляли полученные результаты с базовым вариантом векторного управления. Такая постановка позволяет судить о практической применимости метода еще до перехода к физическому стенду.

На рис. 1 показан переход MIC (Motor Intelligent Control) от разработки к эксплуатации.

Этап 1 (модельный). MIC обучается в среде математической модели АД на наборе режимов и разбросе параметров. Цель этапа — получить устойчивую стартовую политику и отладить процедуру обучения без риска для оборудования, обеспечив переносимость на разные двигатели.

Этап 2 (перенос на стенд). MIC переносится на реальный привод (АИН-АД), и выполняется ускоренная адаптация под конкретный двигатель с использованием БЭК (бесконтактного энкодера) как источника обратной связи и средства контроля качества. Цель этапа —

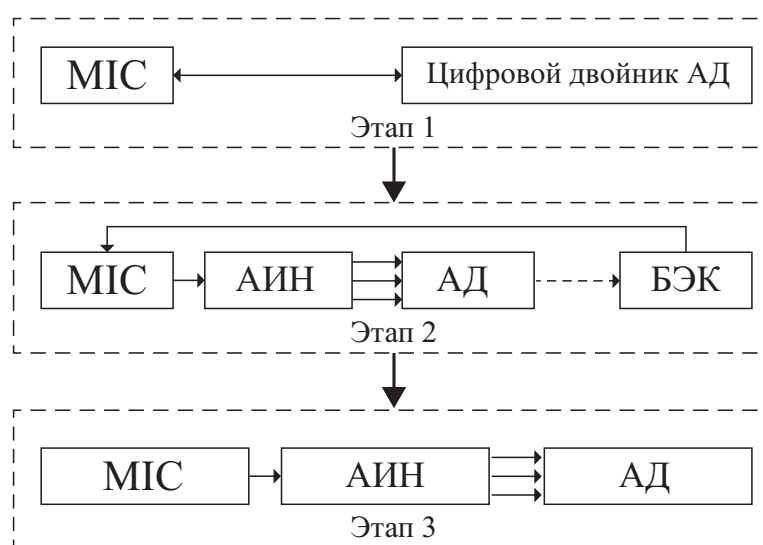


Рис. 1. Схема обучения алгоритма MIC

быстро подстроить политику к реальным нелинейностям, потерям, насыщению и задержкам, минимизируя число экспериментов.

Этап 3 (эксплуатация без БЭК). Обучение отключается, энкодер выводится из контура, и МПС управляет АИН без обратной связи по скорости, используя выученный закон управления [6]. Цель этапа — обеспечить работу привода без датчика скорости и снизить требования к измерительной части при сохранении заданного качества управления. В отличие от классической иерархии (скорость — ток — напряжение), здесь нейросеть решает задачу оптимального управления за один шаг.

Прямое обучение на реальном стенде на начальном этапе работы представляется нецелесообразным, поскольку большое число пробных воздействий повышает вероятность аварийных режимов и существенно увеличивает время отладки. Поэтому агент обучался на цифровом двойнике асинхронного двигателя. В этой среде многократно воспроизводились разгон, торможение и установившиеся режимы без риска для оборудования. Функция вознаграждения задавалась по двум основным признакам: ошибке по скорости и уровню потребляемой мощности. Тем самым агент настраивался не только на достижение требуемой скорости, но и на выбор более экономичного режима работы. Использование цифрового двойника позволило рассмотреть большое число эпизодов и получить стратегию, в которой динамические и энергетические требования учитываются одновременно.

Цифровой двойник использовался не только как безопасная среда обучения, но и как инструмент оценки чувствительности алгоритма к изменению параметров привода. В модели варьировали нагрузку, момент инерции и параметры двигателя, после чего проверяли, сохраняется ли работоспособность обученной

политики. При переносе алгоритма с модели на физический объект необходимо учитывать эффект *sim-to-real*, то есть возможное расхождение между поведением цифрового двойника и реального привода. Для уменьшения этого расхождения целесообразно вводить случайный разброс параметров уже на этапе обучения. В таком случае агент взаимодействует не с единственным вариантом модели, а с семейством близких режимов, что обычно повышает устойчивость его поведения при переходе к реальному объекту [7–9].

Для обучения агента использовались современные алгоритмы глубокого RL, предназначенные для задач с непрерывным пространством действий, в частности применялись методы Twin Delayed DDPG (TD3) и сравнительно Proximal Policy Optimization (PPO). Эти алгоритмы на каждом шаге симуляции обновляют параметры нейросети агента, стремясь увеличить суммарное дисконтированное вознаграждение за эпизод. Обучение проводилось онлайн: агент взаимодействовал с цифровым двойником в ходе множества эпизодов, постепенно улучшая стратегии.

Эпизоды моделировали стандартные рабочие циклы привода: разгон до требуемой скорости, удержание нагрузки, торможение. По мере накопления опыта агент уменьшал ошибку слежения за скоростью и энергопотребление, приближаясь к оптимальной политике по заданному критерию.

После завершения обучения полученную политику необходимо согласовать с вычислительными ограничениями встроеной платформы. Исходная модель агента, обученная в симуляции, содержит слишком большое число параметров для устойчивого выполнения в реальном времени на микроконтроллере. Поэтому на следующем этапе использовалась дистилляция: компактную сеть обучали

воспроизводить действия исходного агента на тех же входных состояниях [10]. Такой прием позволяет уменьшить размер модели без существенной потери качества управления. В итоге формируется облегченная политика, пригодная для исполнения на встроенном устройстве и сохраняющая основные особенности поведения исходного агента.

Обучение проводится офлайн на более мощном вычислителе, но итоговая инференс-модель приводится к форме, пригодной для микроконтроллера. Такой подход обеспечивает автономность системы МИС: после этапа лабораторного обучения интеллектуальный контроллер можно загрузить во встроенный блок управления привода и эксплуатировать подобно обычному частотному преобразователю, без постоянного подключения к внешнему компьютеру.

В системе МИС управление асинхронным электроприводом реализуется на основе нейросетевого алгоритма обучения с подкреплением, выполняющего функцию основного регулятора. Обучение алгоритма проводится в виртуальной среде, включающей цифровой двойник асинхронного двигателя и модель силового инвертора. В процессе обучения RL-агент взаимодействует с математической моделью привода, получая измеряемые параметры состояния, в частности скорость вращения и токи статора, и формируя управляющие воздействия для инвертора. Качество управления оценивается по точности регулирования скорости и энергетической эффективности режима. В результате многократных эпизодов обучения агент формирует стратегию управления, обеспечивающую компромисс между динамическими и энергетическими показателями без использования априорной математической модели двигателя.

После завершения этапа обучения нейросетевая модель подвергается процедурам оптимизации и сжатия и может быть реализована

в виде компактного контроллера, предназначенного для работы на встроенной вычислительной платформе. В режиме эксплуатации контроллер использует измеряемые сигналы привода для формирования управляющих воздействий на силовой инвертор, при этом структура силовой части и стандартные защитные функции сохраняются. Существенной особенностью предлагаемого подхода является то, что ограничения по токам и режимам работы учитываются не внешними ограничителями, а заложены непосредственно в стратегию управления, сформированную в процессе обучения.

Для оценки поведения алгоритма МИС выполнена серия численных экспериментов на цифровом двойнике асинхронного электродвигателя в режиме ступенчатого изменения нагрузки. В качестве базового метода сравнения использовалось классическое векторное управление (FOC) с PI-регуляторами. Эксперименты проводились в двух режимах (рис. 3): стадия 0 соответствовала нагрузке $0,5M_{ном}$, а стадия 1 — нагрузке $1,0M_{ном}$. В качестве критериев оценки рассматривались среднеквадратичный ток статора, средняя потребляемая активная электрическая мощность асинхронного двигателя и средняя абсолютная ошибка регулирования скорости.

Энергетический эффект применения МИС оценивали по временной зависимости активной мощности и сопоставляли с результатами, полученными для FOC. В переходном процессе различие между кривыми оставалось небольшим, однако после выхода в установившийся режим зависимость для МИС располагалась ниже, чем для FOC. На выбранном интервале усреднения снижение активной мощности составило 8,4 %. Этот результат согласуется с уменьшением среднеквадратичного тока статора и показывает, что выигрыш по энергии достигается не за счет ухудшения регулирования скорости,

а вследствие более экономичного режима работы привода в установившемся состоянии.

На рис. 3 представлены рабочие характеристики привода АИР-56 при управлении FOC и МІС.

Сопоставление рабочих характеристик показывает, что после этапа адаптивного обучения

регулятор МІС воспроизводит зависимости, качественно согласующиеся с характеристиками эталонного FOC во всем исследованном диапазоне нагрузок. В области, близкой к максимальной нагрузке, наблюдается устойчивый энергетический эффект: при управлении МІС входная мощность несколько ниже, а КПД

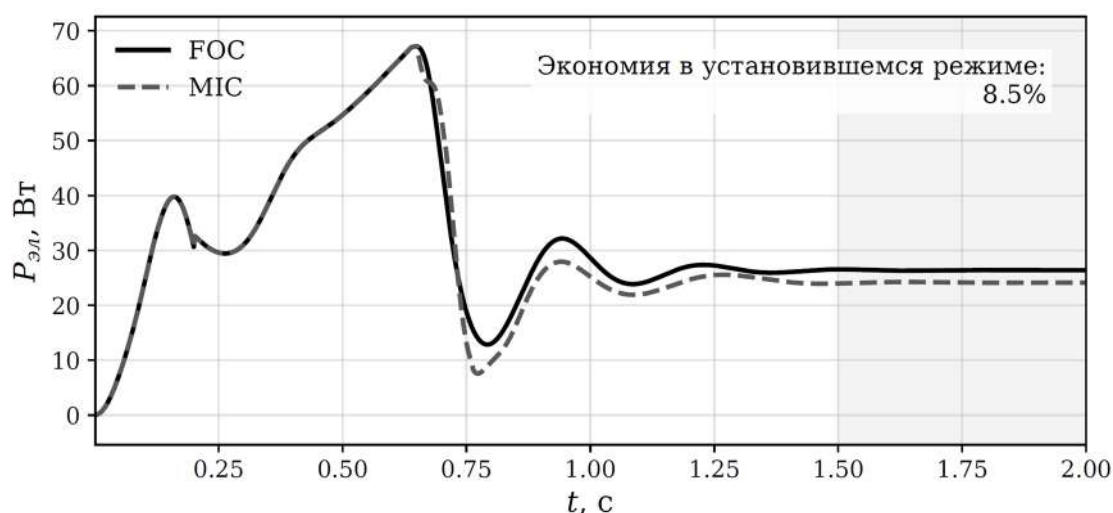


Рис. 2. Сравнение потребляемой электрической мощности электропривода при управлении FOC и МІС

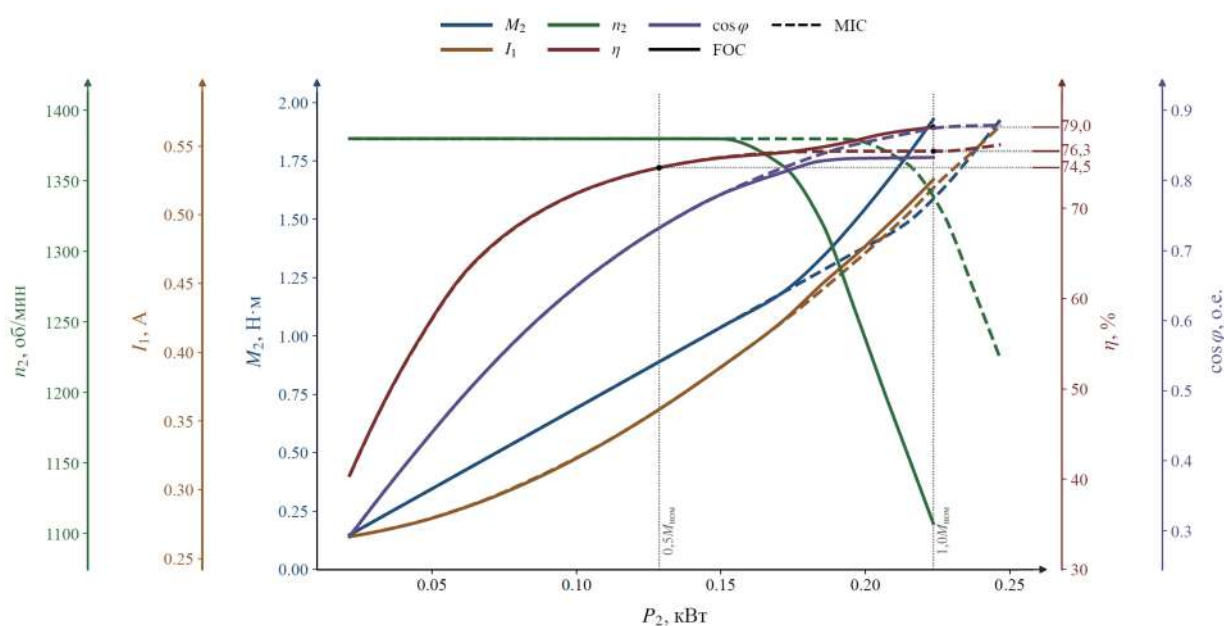


Рис. 3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

несколько выше, чем при ФОС. Наиболее заметно это проявляется в высоконагруженном режиме, где энергетические потери максимальны. При этом форма механических характеристик остается физически корректной: с ростом нагрузки момент и ток возрастают монотонно, а скорость уменьшается контролируемым образом. Настройка регулятора выполнялась без предварительной идентификации полного набора параметров двигателя; обучение велось по измеряемым сигналам, что указывает на устойчивость сформированной стратегии управления. Следовательно, даже при неопределенности параметров объекта МИС обеспечивает качество регулирования, сопоставимое с ФОС, и одновременно демонстрирует устойчиво воспроизводимый энергетический выигрыш в области высоких нагрузок. Дополнительной особенностью подхода является отсутствие каких-либо устройств на роторе двигателя.

По результатам моделирования могут быть сформулированы следующие выводы:

1. В структуре МИС управляющие воздействия формируются RL-агентом непосредственно в d-q-координатах, без каскада PI-регуляторов по току. Обучение проводилось в среде цифрового двойника, что позволило отработать стратегию управления без предварительной настройки полной параметрической модели двигателя.

2. В обеих исследованных стадиях для МИС получено снижение среднеквадратичного тока статора по сравнению с ФОС. Это указывает на менее нагруженный режим работы двигателя при сохранении требуемого режима регулирования.

3. Средняя активная мощность в режиме МИС оказалась ниже, чем при ФОС. На интервале установившегося режима снижение составило 8,4%, поэтому речь идет не только о визуальном расхождении кривых, но и о ко-

личественно подтверждаемом энергетическом эффекте.

4. По качеству регулирования скорости МИС не уступал базовому варианту ФОС, а в отдельных режимах показывал меньшую среднюю абсолютную ошибку. Следовательно, снижение потребляемой мощности не сопровождалось заметным ухудшением динамических свойств привода.

5. Полученные данные показывают, что выбранная функция вознаграждения действительно смещает стратегию агента к компромиссу между точностью регулирования и энергопотреблением.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают работоспособность подхода и позволяют перейти к следующему этапу, связанному с переносом упрощенной нейросетевой политики на реальный стенд и ее последующей экспериментальной проверкой.

Список источников

1. Kazemikia D. Reinforcement Learning for Motor Control: a Comprehensive Review // arXiv preprint. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.17936> (дата обращения: 15.12.2025).
2. Field-Oriented Control of PMSM Using Reinforcement Learning // MathWorks Motor Control Blockset Example. URL: <https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/foc-of-pmsm-using-reinforcement-learning.html> (дата обращения: 15.12.2025).
3. AI-Based Field-Oriented Control for Induction Motors / E. Benmalek [et al.] // IAPGOS. 2024. Vol. 14, № 4. Pp. 75–81. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.6253> (дата обращения: 15.12.2025).
4. Enhanced Induction Motor Control Using Deep Reinforcement Learning and PWM with DTC / P. Saurabh [et al.] // Electric Power Components and Systems. 2023. Vol. 51, no. 12. Pp. 1083–1095. URL: <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2274357> (дата обращения: 15.12.2025).

5. Lenz I., Knepper R., Saxena A. DeepMPC: Learning Deep Latent Features for Model Predictive Control // Proc. of Robotics: Science and Systems. 2015. URL: <https://doi.org/10.15607/RSS.2015.XI.012> (дата обращения: 15.12.2025).
 6. Sensorless Speed Control of Induction Motor Drives Using Reinforcement Learning and Self-Tuning Simplified Fuzzy Logic Controller / Q. Abdullah [et al.] // IEEE Access. 2024. Vol. 12. Pp. 136485–136501. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3435529> (дата обращения: 15.12.2025).
 7. Eschmann J., Albani D., Loianno G. RLtools: A Fast, Portable Deep Reinforcement Learning Library for Continuous Control // Journal of Machine Learning Research. 2024. Vol. 25, no. 301. Pp. 1–19. URL: <https://www.jmlr.org/papers/v25/24-0248.html> (дата обращения: 15.12.2025).
 8. TinyRL: Towards Reinforcement Learning on Tiny Embedded Devices / T. Szydlo [et al.] // Proc. of the 31st ACM Int. Conf. on Information and Knowledge Management (CIKM). 2022. Pp. 4985–4988. URL: <https://doi.org/10.1145/3511808.3557206> (дата обращения: 15.12.2025).
 9. Enhancing Field-Oriented Control of Electric Drives with Tiny Neural Network Optimized for Microcontrollers / M. J. Mouk Elele [et al.] // arXiv preprint. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.00532> (дата обращения: 15.12.2025).
 10. A Survey of Reinforcement Learning-Driven Knowledge Distillation: Techniques, Challenges, and Applications / Z. Xu [et al.] // Preprints. 2025. URL: <https://doi.org/10.20944/preprints202503.0903.v2> (дата обращения: 15.12.2025).
- Дата поступления: 13.05.2026
Решение о публикации: 07.07.2026
- Контактная информация:**
МАРИКИН Александр Николаевич — доктор техн. наук, профессор; marikin_s@mail.ru
ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — доктор техн. наук, профессор; evstam@mail.ru
ЖЕМЧУГОВ Валерий Григорьевич — кандидат техн. наук, доцент, zhemchugov@pgups.ru
ОНОФРИЙЧУК Андрей Дмитриевич – аспирант, 11lisov11@gmail.com

Study of Direct Neural Control of an Induction Motor Trained in a Digital Twin

A. N. Marikin, A. M. Evstaf'ev, V. G. Zhemchugov, A. D. Onofriychuk

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Marikin A. N., Evstaf'ev A. M., Zhemchugov V. G., Onofriychuk A. D. Study of Direct Neural Control of an Induction Motor Trained in a Digital Twin // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 596–603. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-596-603 (In Russian)

Abstract

Objective: to assess the feasibility of direct neural control of an induction motor drive without a fully specified mathematical model of the motor and to determine whether this approach can reduce active power consumption while maintaining speed-control quality comparable to classical field-oriented control. **Methods:** the study was carried out on a digital-twin model of the inverter-induction motor-controller system. A reinforcement learning agent was trained to generate control actions in the d-q reference frame, and its performance was compared with FOC using the stator RMS current, active power, and speed-control

error as evaluation criteria. **Practical significance:** the trained policy can potentially be transferred to an embedded drive-control platform. This reduces the dependence of control quality on accurate parameter identification and makes the approach relevant for energy-efficient electric drives.

Keywords: induction motor, electric drive, reinforcement learning, digital twin, neural network control, field-oriented control

References

1. Kazemikia D. Reinforcement Learning for Motor Control: A Comprehensive Review, arXiv preprint, 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.17936> (accessed: December 15, 2025)
2. Field-Oriented Control of PMSM Using Reinforcement Learning, MathWorks Motor Control Blockset Example. URL: <https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/foc-of-pmsm-using-reinforcement-learning.html> (accessed: December 15, 2025)
3. Benmalek E., et al. AI-Based Field-Oriented Control for Induction Motors, IAPGOS, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 75–81. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.6253> (accessed: December 15, 2025)
4. Saurabh P., et al. Enhanced Induction Motor Control Using Deep Reinforcement Learning and PWM with DTC, Electric Power Components and Systems, 2023, vol. 51, no. 12, pp. 1083–1095. URL: <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2274357> (accessed: December 15, 2025)
5. Lenz I., Knepper R., Saxena A. DeepMPC: Learning Deep Latent Features for Model Predictive Control, Proceedings of Robotics: Science and Systems, 2015. URL: <https://doi.org/10.15607/RSS.2015.XI.012> (accessed: December 15, 2025).
6. Abdullah Q., et al. Sensorless Speed Control of Induction Motor Drives Using Reinforcement Learning and Self Tuning Simplified Fuzzy Logic Controller, IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 136 485–136 501. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3435529> (accessed: December 15, 2025).
7. Eschmann J., Albani D., Loianno G. RLtools: A Fast, Portable Deep Reinforcement Learning Library for Continuous Control, Journal of Machine Learning Research, 2024, vol. 25, no. 301, pp. 1–19. URL: <https://www.jmlr.org/papers/v25/24-0248.html> (accessed: December 15, 2025).
8. Szydlo T., et al. TinyRL: Towards Reinforcement Learning on Tiny Embedded Devices, Proceedings of the 31st ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM), 2022, pp. 4985–4988. URL: <https://doi.org/10.1145/3511808.3557206> (accessed: December 15, 2025).
9. Mouk Elele M. J., et al. Enhancing Field-Oriented Control of Electric Drives with Tiny Neural Network Optimized for Microcontrollers, arXiv preprint, 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.00532> (accessed: December 15, 2025).
10. Xu Z., et al. A Survey of Reinforcement Learning Driven Knowledge Distillation: Techniques, Challenges, and Applications, Preprints, 2025. URL: <https://doi.org/10.20944/preprints202503.0903.v2> (accessed: December 15, 2025).

Received: May 13, 2026

Accepted: July 07, 2026

Author's information:

Aleksandr N. MARIKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; marikin_s@mail.ru

Andrej M. EVSTAF'EV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; evstam@mail.ru

Valerij G. ZHEMCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; zhemchugov@pgups.ru

Andrej D. ONOFRIJCHUK — Postgraduate Student; 11lisov11@gmail.com

УДК 621.54+06

Оценка влияния факторов воздействия на срок службы алюмогелей, применяемых в технологических схемах осушки сжатого воздуха пневмосистем подвижного состава локомотивов

Т. Л. Риполь-Сарагоси¹, Д. А. Мальцев²

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

² ООО НПО «Турбулентность-ДОН», Россия, 344068, Ростовская обл., Мясникованский р-н, а/д Ростов-на-Дону — Новошахтинск, 1-й км, стр. 6/8

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л., Мальцев Д. А. Оценка влияния факторов воздействия на срок службы алюмогелей, применяемых в технологических схемах осушки сжатого воздуха пневмосистем подвижного состава локомотивов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 604–613. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-604-613

Аннотация

Цель: проведение инженерных расчетов с использованием выбранной математической модели, определяющей связь между влиянием температуры, относительной влажности атмосферного воздуха, поступающего в компрессор, а также требуемого класса его чистоты после сжатия в компрессоре и проведения процесса осушки в адсорбере на срок службы адсорбента при использовании различных модификаций алюмогеля для определения возможности и целесообразности его использования в практике эксплуатации локомотивов подвижного состава магистрального и промышленного транспорта. **Методика:** с целью установления степени влияния конкретных физических параметров воздуха окружающей среды и компримированного воздуха в соответствии с нормативными документами, устанавливающими эти значения в пределах определенных классов чистоты на время эксплуатации адсорбента, применена теоретическая методика исследования, не предполагающая непосредственное взаимодействие с изучаемым объектом. **Методы:** в работе применены следующие методы: анализ, формализация, абстрагирование и метод корреляции полученных итогов с их последующим представлением в табличной и графической формах, которые впоследствии определили основу сформулированных выводов и рекомендаций по обоснованию возможности использования исследуемого адсорбента по критерию «длительность срока эксплуатации». **Практическая значимость:** проведенные исследования дают возможность представления аргументированных рекомендаций для осуществления обоснованного выбора адсорбента, используемого в технологических схемах осушки сжатого воздуха пневмосистем подвижного состава локомотивов магистрального и промышленного транспорта, а также предприятий железнодорожной отрасли. **Результаты:** с помощью исследований возможно реализовать программу по снижению ресурсоемкости и ослабить негативное воздействие на окружающую среду вследствие снижения количества подлежащих захоронению использованных ресурсов.

Ключевые слова: график, параметры наружного воздуха, ресурсы, окружающая среда, адсорбция, адсорбент, алюмогель, компримированный воздух

Введение

Общеизвестно, что на величину срока службы алюмогелей при использовании их в качестве адсорбентов в технологическом процессе осушки сжатого воздуха оказывает влияние значительное количество факторов, среди которых основными можно считать:

- термодинамические параметры воздушной среды перед ее поступлением в компрессор;
- давление компримирования, влияющее на температуру сжатого воздуха;
- регламент использования адсорбента;
- используемая технология восстановления;
- требуемые по регламенту показатели чистоты сжатого воздуха [2] после прохождения адсорбера.

Помимо основных вышеперечисленных факторов влияния, имеются еще и дополнительные, к которым можно отнести присутствие агрессивных сред в сжатом воздухе, разрушающих гранулы алюмогеля, а значит, снижающих его влагопоглощающую способность и срок службы. Влиянием влаги, находящейся в капельно-дисперсном состоянии, на стабильность поглощающей способности для алюмогелей, особенно модификации D, можно пренебречь. К явным достоинствам алюмогелей относится также их устойчивость к истиранию, что обусловлено сферической формой частиц этого адсорбента и, как следствие, более высокими сроками службы. Наличие сферической формы позволяет также производить компактно-равномерную загрузку, что снижает объем воздушной фазы в адсорбере и тем самым повышает его энергоэффективность.

Важным аспектом рассмотрения влияния повышения температуры сжатого воздуха перед адсорбером является увеличение кинетической энергии молекул воды, снижающей возможность их удержания на поверхности адсорбен-

та, что сказывается на качественных характеристиках дегидратируемого воздуха, определяя необходимость возобновления цикла дегидратации, что реально снижает ее долговечность. Таким образом, любое повышение температуры воздуха (как окружающей среды, так и воздуха после компримирования) приведет к повышению энергозатратности технологии осушки (дегидратации) воздуха в применении технологии адсорбционной осушки.

Повышение давления компримирования воздуха, в свою очередь, также будет оказывать негативное влияние на срок службы адсорбента вследствие появления неодинаковой его выработки и нагрузки в различных зонах адсорбера.

Несомненно, на срок службы адсорбента влияет относительная влажность воздуха, определяя количество находящейся в нем влаги. Чем выше влажность воздуха, как атмосферного, так и, естественно, сжатого, тем выше нагрузка на адсорбент, ниже его способность к осушке сжатого воздуха до значений, соответствующих высоким классам чистоты, и меньше срок его службы.

На основании вышесказанного определена цель проводимого исследования, заключающаяся в установлении влияния определенных факторов на срок службы различных видов алюмогеля.

Объект исследования

Для исследования влияния обозначенных выше факторов на срок службы выбранных видов алюмогеля были определены два вида адсорбента марки Alumac 4-8 D и Alumac 2-5 A ввиду высоких значений их адсорбционной площади, пор, имеющих большой объем, высокой устойчивости к истиранию. Alumac 2-5 A имеет высокие адсорбционные характеристики, сохраняет высокую прочность и устойчивость к истиранию. Сферическая

форма гранул данного алюмогеля позволяет производить загрузку данной модификации с наименьшей усадкой, а высокие уровни инертности, микропористости и гидрофильности позволяют осушать сжатый воздух до низких значений температуры точки росы. Ввиду высокой прочности Alumac выдерживает до 600 циклов регенерации без нарушения структуры гранул.

В качестве диапазона температур для проведения исследований был выбран интервал их изменения от -5 до $+5$ °C. Данный интервал изменения температур наружного воздуха представляет собой наибольшую угрозу для гарантии обеспечения штатного режима функционирования пневматических магистралей тягового подвижного состава в режиме эксплуатации. Изменение относительной влажности наружного воздуха было определено в диапазоне от 50 до 100 %. Несомненным

также является тот факт, что класс чистоты осушенного компримированного воздуха можно считать третьим фактором влияния на срок службы алюмогеля.

Обсуждение

Таким образом, для определения степени влияния перечисленных факторов на продолжительность эксплуатации алюмогеля марки Alumac 4-8 D проведем расчеты в соответствии с алгоритмом, представленным в [2–5], а результаты расчетов представим в табл. 1.

Целью расчета было определение количества дней (часов) эксплуатации вышеназванного адсорбента без его регенерации либо полной или частичной замены [6–10].

Рассмотрим графическую интерпретацию полученных результатов на рис. 1–3.

Основной задачей исследования было: количественно определить влияние указанных

ТАБЛИЦА 1. Время гарантированной эксплуатации алюмогеля марки Alumac 4-8 D для заявленных классов чистоты сжатого воздуха

		Класс чистоты								
		1-й			2-й			3-й		
Влажность	Срок службы	-5 °C	0 °C	5 °C	-5 °C	0 °C	5 °C	-5 °C	0 °C	5 °C
50 %	Часов	2222	1514	1039	2385	1591	1075	4599	2381	1401
	Дней	93	63	43	99	66	45	192	99	58
60 %	Часов	1816	1236	848	1925	1288	872	3189	1775	1081
	Дней	76	52	35	80	54	36	133	74	45
70 %	Часов	1531	1042	714	1609	1079	732	2426	1408	876
	Дней	64	43	30	67	45	30	101	59	36
80 %	Часов	1321	898	615	1379	926	628	1950	1163	734
	Дней	55	37	26	57	39	26	81	48	31
90 %	Часов	1159	788	539	1205	810	550	1626	988	630
	Дней	48	33	22	50	34	23	68	41	26
100 %	Часов	1032	701	480	1068	718	488	1391	857	551
	Дней	43	29	20	44	30	20	58	36	23

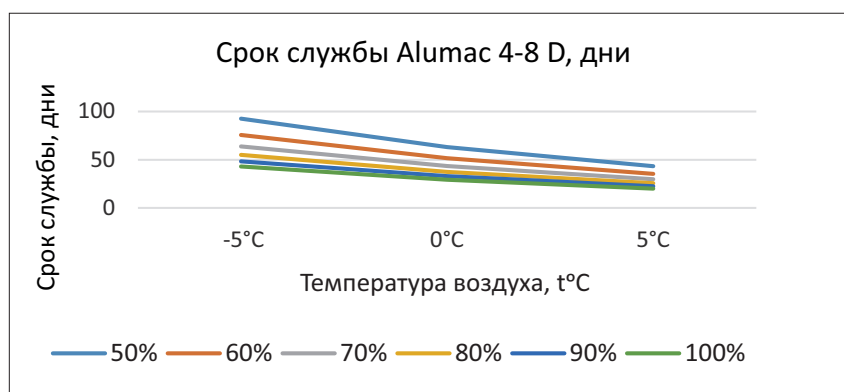


Рис. 1. Депенденция срока эксплуатации алюмогеля Alumas 4-8 D от выявленных факторов влияния — 1-й класс чистоты компримированного воздуха

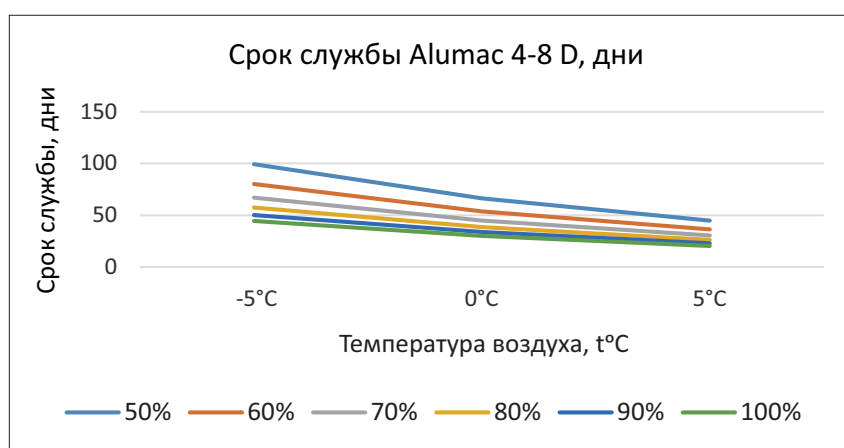


Рис. 2. Депенденция срока эксплуатации алюмогеля Alumas 4-8 D от выявленных факторов влияния — 2-й класс чистоты компримированного воздуха

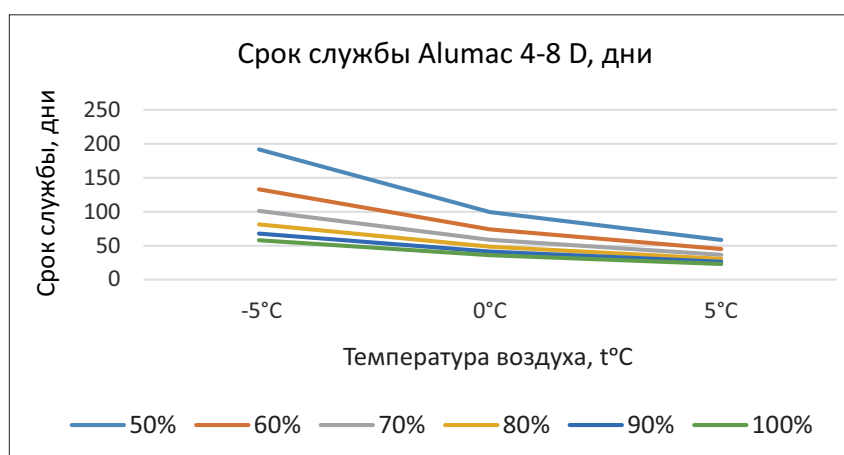


Рис. 3. Депенденция срока эксплуатации алюмогеля Alumas 4-8 D от выявленных факторов влияния — 3-й класс чистоты компримированного воздуха

факторов и проследить, как меняется их процентное содержание в зависимости от этих факторов для класса чистоты, установленного нормативными документами [1]. Результаты, представленные на рис. 1–3, позволяют сделать следующие выводы:

- Срок службы адсорбента сокращается при увеличении относительной влажности и температуры наружного воздуха, поступающего в компрессор, а также в процессе его сжатия и дегидратации в адсорбере с использованием алюмогеля Alumac 4-8 D. Для 1-го класса чистоты снижение составляет 53–54 %. При дальнейшем повышении влажности и температуры показатель остается стабильным и практически не меняется при изменении любого из рассматриваемых факторов влияния. Это позволяет утверждать, что данные факторы оказывают сопоставимое воздействие на срок службы адсорбента.

- Для 2-го класса чистоты (с учетом заданных уровней содержания влаги в сжатом воздухе) сокращение времени гарантированной эксплуатации алюмогеля в указанных интервалах изменения влагосодержания и температуры наружного воздуха варьируется от 54 до 56 %. Для 3-го класса чистоты при аналогичных изменениях факторов воздействия этот показатель составляет 61–70 %. Такое увеличение процентного изменения срока службы Alumac 4-8 D обусловлено нелинейным изменением равновесной величины адсорбции.

Далее представим результаты аналогичных исследований, проведенных для алюмогеля марки Alumac 2-5 A в табл. 2 и на рис. 4–6.

Данные, представленные в табл. 2, получены при проведении расчетов по представленному и описанному выше алгоритму. Далее перейдем к их графической визуализации (рис. 4–6).

ТАБЛИЦА 2. Время гарантированной эксплуатации алюмогеля марки Alumac 2-5 A для заявленных классов чистоты сжатого воздуха

		Класс чистоты								
		1-й			2-й			3-й		
Влажность	Срок службы	–5 °C	0 °C	5 °C	–5 °C	0 °C	5 °C	–5 °C	0 °C	5 °C
50 %	Часов	2226	1517	1040	2389	1593	1077	4607	2385	1404
	Дней	93	63	43	100	66	45	192	99	58
60 %	Часов	1819	1239	849	1329	1290	874	3194	1778	1082
	Дней	76	52	35	80	54	36	133	74	45
70 %	Часов	1534	1044	715	1612	1081	733	2430	1410	877
	Дней	64	43	30	67	45	31	101	59	37
80 %	Часов	1323	900	616	1382	928	629	1953	1165	735
	Дней	55	37	26	58	39	26	81	49	31
90 %	Часов	1161	789	540	1207	811	551	1628	990	631
	Дней	48	33	23	50	34	23	68	41	26
100 %	Часов	1033	702	480	1070	720	489	1393	859	552
	Дней	43	29	20	45	30	20	58	36	23

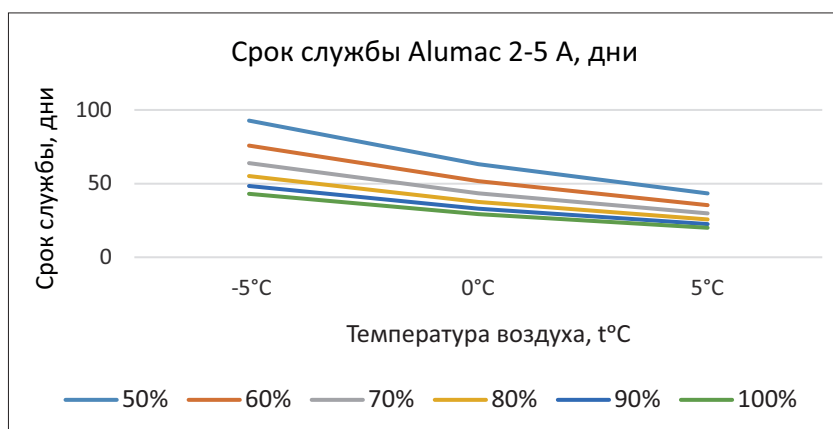


Рис. 4. Депенденция срока эксплуатации алюмогеля Alumas 2-5A от выявленных факторов влияния — 1-й класс чистоты компримированного воздуха

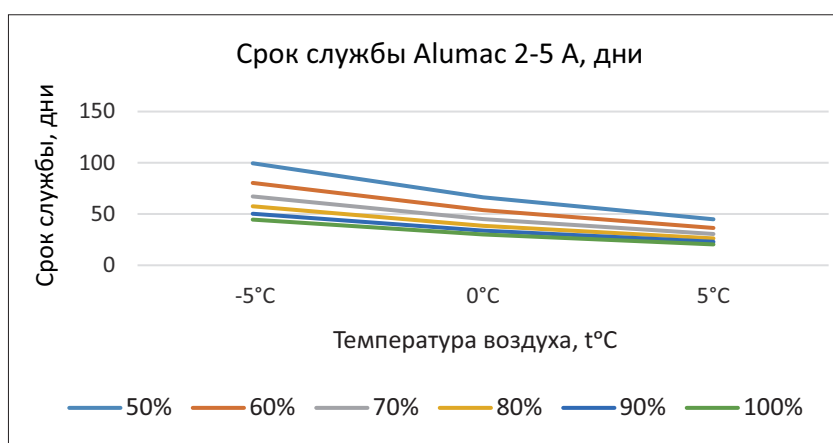


Рис. 5. Депенденция срока эксплуатации алюмогеля Alumas 2-5 A от выявленных факторов влияния — 2-й класс чистоты компримированного воздуха

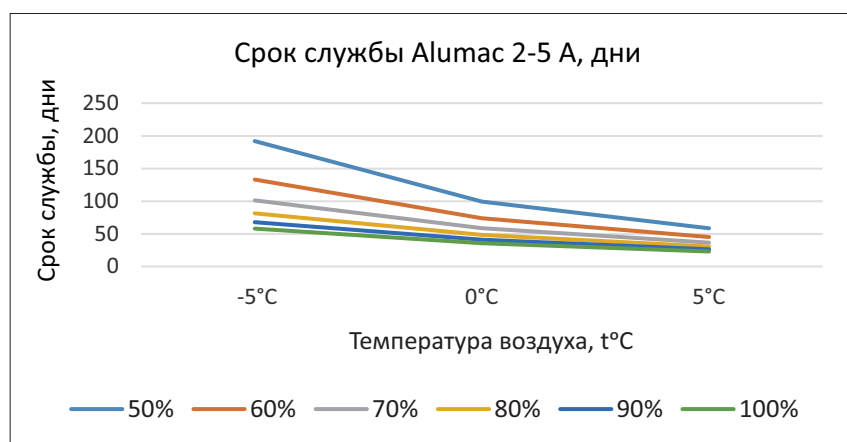


Рис. 6. Депенденция срока эксплуатации алюмогеля Alumas 2-5 A от выявленных факторов влияния — 3-й класс чистоты компримированного воздуха

Анализ результатов определения срока службы алюмогеля марки Alumac 2-5 А (сведены в табл. 2) позволяет сделать вывод: изменение температуры атмосферного воздуха (в диапазоне от -5 до $+5$ °С) и его относительной влажности (от 50 до 100 %) снижает время эксплуатации данной марки алюмогеля в том же диапазоне, что и для марки Alumac 4-8 D.

Выводы

Использование в представленных исследованиях метода цепных подстановок, являющегося одним из методов аналитических исследований, позволяет:

- провести сравнение влияния температуры атмосферного воздуха и его относительной влажности, а также требуемого класса чистоты по содержанию влаги в сжатом воздухе на срок службы двух видов адсорбента (Alumac 4-8 D и Alumac 2-5A);
- определить степень данного влияния в процентном выражении, которая для выбранных видов алюмогеля будет равна 53–54 % при повышении относительной влажности и 55–56 % при повышении температуры для требований 1-го и 2-го классов чистоты осушки по содержанию влаги соответственно и 61–69 % процентов для требований 3-го класса чистоты по содержанию влаги;
- утверждать об отсутствии принципиальных отличий в изменении срока эксплуатации исследуемых видов адсорбентов при повышении относительной влажности, температуры наружного воздуха и содержания влаги в осушенном компримированном воздухе для вышеобозначенных классов чистоты;
- ввиду отсутствия принципиальных отличий, касающихся предмета исследования — влияния перечисленных выше факторов на срок службы адсорбента, рекомендации по приоритету использования в технологических

процессах осушки сжатого воздуха в пневмосистемах подвижного состава магистрального и промышленного транспорта одного из перечисленных видов алюмогеля отсутствуют.

Список источников

1. ГОСТ 32202-2013 «Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава». М., 2019.
2. Риполь-Сарагоси Т. Л., Гладких М. А. Снижение энергоемкости процесса адсорбции при использовании композитных адсорбентов // 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. EDN WCTFHI
3. Шумяцкий Ю. И. Адсорбционные процессы: учебное пособие. М.: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2005.
4. Дубинин М. М., Зуев А. Г. Адсорбционные свойства и структура силикагелей и алюмогелей // Физическая химия. Доклады Академии наук СССР 1949. Том LXIX, № 2.
5. Риполь-Сарагоси Т. Л. 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
6. Гаврилова Н. Н., Назаров В. В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных: учеб. пособие. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. 132 с.
7. Сравнительные адсорбционные свойства термохимически модифицированных кремнеземных сорбентов и алюмогеля / В. П. Горшунова [и др.] // Химия, новые материалы, химические технологии: внутривузовский сборник научных трудов. Выпуск 1. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2011. С. 81–86. EDN NRSCUV

8. Кожевникова И. В., Сафиуллина Т. Р., Зенитова Л. А. Промышленные отходы силикагеля, цеолита и алюмогеля как основная составляющая полиуретановых композиционных материалов // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии: материалы IX Международной научно-практической конференции (Нижнекамск, 5–7 апреля 2016 года). Нижнекамск: Нижнекамск-нефтехим, 2016. С. 56. EDN WIPOZP

9. Современные технологии энергосбережения в теплоснабжении / И. А. Эстрин [и др.] // Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 года). Ростов н/Д.:

Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. Т. 3. С. 56–60. EDN SPNGQN

10. Смаглюков Д. А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭП20: учебное пособие. М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015. 360 с.

Дата поступления: 01.05.2026

Решение о публикации: 22.06.2026

Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — доктор техн. наук, профессор; ripol-saragosi@mail.ru;
МАЛЬЦЕВ Дмитрий Алексеевич — инженер;
dmitrimalzev2000@gmail.com

Assessment of the Influence of Impact Factors on the Service Life of Aluminum Gels Used in Technological Schemes for Drying Compressed Air in Pneumatic Systems of Locomotive Rolling Stock

T. L. Ripol'-Saragosi¹, D. A. Mal'tsev²

¹ Rostov State University of Railway Transport, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

² LLC NPO Turbulence-DON, 1st km, bldg. 6/8 Rostov-on-Don-Novoshakhtinsk, Myasnikovansky district, Rostov-on-Don, 344068, Russia

For citation: *Ripol'-Saragosi T. L., Mal'tsev D. A. Assessment of the Influence of Impact Factors on the Service Life of Aluminum Gels Used in Technological Schemes for Drying Compressed Air in Pneumatic Systems of Locomotive Rolling Stock // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 604–613. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-604-613 (In Russian)*

Abstract

Purpose: to carry out engineering calculations using a selected mathematical model that determines the relationship between the influence of temperature, relative humidity of atmospheric air entering the compressor, as well as the required purity class after compression in the compressor and the drying process in the adsorbent, on the service life of the adsorbent when using various modifications of the alumogel brand — to determine the possibility and expediency of its for use in the operation of locomotives of rolling stock of mainline and industrial transport. **Methodology:** in order to establish the degree of influence of specific physical parameters of ambient air and compressed air, in accordance with regulatory documents establishing these values within certain purity classes for the duration of adsorbent operation, a theoretical research methodology has been applied that does not involve direct interaction with the studied object. **Methods:** the following methods were used in the work: analysis, formalization, abstraction and the method of correlation of the results obtained with their subsequent presentation in tabular and graphical forms, which subsequently determined the basis of the formulated conclusions and recommendations

to substantiate the possibility of using the adsorbent under study according to the criterion of “service life”. **Practical significance:** the results of the presented studies make it possible to provide a reasoned recommendation for making an informed choice of adsorbent used in technological schemes for drying compressed air in pneumatic systems of rolling stock of locomotives of mainline and industrial transport, as well as enterprises of the railway industry. **Results:** this will make it possible to implement a program to reduce resource intensity and reduce the negative impact on the environment due to a decrease in the amount of used resources to be disposed of.

Keywords: graph, outdoor air parameters, resources, environment, adsorption, adsorbent, alumogel, compressed air

References

1. GOST 32202-2013 Szhatyj vozdukh pnevmaticheskikh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Compressed Air for Pneumatic Systems of Railway Rolling Stock], 2019. (In Russian)
2. Ripol'-Saragosi T. L., Gladkikh M. A. Snizhenie energoemkosti protsessa adsorbtsii pri ispolzovanii kompozitnykh adsorbentov [Reducing the Energy Intensity of the Adsorption Process When Using Composite Adsorbents], *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Transport: Science, Education, Production: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*, Rostov-on-Don, April 19–21, 2021, vol. 2, Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2021, pp. 83–86. EDN WCTFHI (In Russian)
3. Shumyatskiy Yu. I. Adsorbtsionnye protsessy: uchebnoe posobie [Adsorption Processes: A Textbook], D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2005. (In Russian)
4. Dubinin M. M., Zuev A. G. Adsorbtsionnye svoystva i struktura silikageley i alumogely [Adsorption Properties and Structure of Silica Gels and Alumina Gels], *Fizicheskaya khimiya. Doklady Akademii Nauk SSSR [Physical Chemistry. Reports of the Academy of Sciences of the USSR]*, 1949, vol. LXIX, no. 2. (In Russian)
5. Ripol'-Saragosi T. L. Issledovanie faktorov vliyaniya na srok sluzhby silikageley [Investigation of Factors Affecting the Service Life of Silica Gels], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the St. Petersburg Transport University]*, St. Petersburg: Petersburg State Transport University, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 1035–1044. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1035-1044 (In Russian)
6. Gavrilova N. N., Nazarov V. V. Analiz poristoy struktury na osnove adsorbtsionnykh dannykh [Analysis of Porous Structure Based on Adsorption Data], Moscow, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2015, 132 p. (In Russian)
7. Gorshunova V. P., et al. Sravnitelnye adsorbtsionnye svoystva termokhimicheskii modifitsirovannykh kremnezemnykh sorbentov i alumogelya [Comparative Adsorption Properties of Thermochemically Modified Silica Sorbents and Alumina Gel], *Khimiya, novye materialy, khimicheskie tekhnologii: vnutrivuzovskiy sbornik nauchnykh trudov [Chemistry, New Materials, Chemical Technologies: In-House Collection of Scientific Papers]*, iss. 1, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2011, pp. 81–86. EDN NRSCUV (In Russian)
8. Kozhevnikova I. V., Safiullina T. R., Zenitova L. A. Promyshlennyye otkhody silikagelya, tseolita i alumogelya kak osnovnaya sostavlyayushchaya poliuretanovykh kompozitsionnykh materialov [Industrial Waste of Silica Gel, Zeolite and Alumina Gel as the Main Component of Polyurethane Composite Materials], *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovatsionnogo razvitiya neftekhimii: materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current State and Prospects of Innovative Development of Petrochemicals: Proceedings of the 9th International*

Scientific and Practical Conference], Nizhnekamsk, April 5–7, 2016, Nizhnekamsk, Nizhnekamskneftekhim, 2016, 56 p. EDN WIPOZP (In Russian)

9. Estrin I. A., et al. *Sovremennye tekhnologii energosberezheniya v teplosnabzhenii* [Modern Energy Saving Technologies in Heat Supply], *Sbornik nauchnykh trudov "Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo": trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of Scientific Papers "Transport: Science, Education, Production": Proceedings of the International Scientific and Practical Conference], Rostov-on-Don, April 26–28, 2023, vol. 3, Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2023, pp. 56–60. EDN SPNGQN (In Russian)

10. Smaglyukov D. A. *Ustroystvo i ekspluatatsiya elektrovoza EP20: uchebnoe posobie* [Design and Operation of the EP20 Electric Locomotive: A Textbook], Moscow, JSC Russian Railways, 2015, 360 p. (In Russian)

Received: May 01, 2026

Accepted: June 22, 2026

Author's information:

Tatiana L. RIPOL'-SARAGOSI — PhD in Engineering, Professor; ripol-saragosi@mail.ru
Dmitriy A. MAL'TSEV — Engineer;
dmitrimalzev2000@gmail.com

УДК 625.111; 519.876.5

Совершенствование методов автоматизированного трассирования железных дорог на основе применения визуальной аналитики

В. А. Анисимов, М. А. Рубцов

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

Для цитирования: Анисимов В. А., Рубцов М. А. Совершенствование методов автоматизированного трассирования железных дорог на основе применения визуальной аналитики // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 614–624. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-614-624

Аннотация

Цель: совершенствование методов автоматизированного трассирования железных дорог на основе применения средств визуальной аналитики. **Методы:** применены математическое моделирование, методы визуального анализа и оптимизации. **Результаты:** рассмотрены проблемы использования классического графоаналитического метода трассирования в автоматизированном проектировании железных дорог. Предложены интерактивные методы трассирования на цифровой модели местности на основе технологичной интеграции аналитических расчетов и визуализации их результатов в режиме реального времени. Реализация предлагаемых методов позволит перейти от традиционного графоаналитического проектирования железных дорог в отдельных проекциях плана и продольного профиля трассы к интерактивному пространственному трассированию. **Практическая значимость:** применение данных методов в автоматизированном проектировании железных дорог позволит обеспечить визуальную экспресс-оценку проектных решений, что снизит трудоемкость вариативного трассирования за счет сокращения количества итераций и времени их выполнения.

Ключевые слова: трасса железной дороги, автоматизированное трассирование, цифровая модель местности, визуальная аналитика, интерактивный метод

Введение

Трассирование новой железнодорожной линии является одним из самых важных этапов проектирования и относится к числу наиболее сложных и трудоемких процессов инженерной деятельности. Оно основано на всестороннем анализе соответствия технических параметров новой железной дороги инженерно-строительным, технико-эксплуатационным и экономическим требованиям (СП 119.13330.2024 «Железные дороги колеи 1520 мм»). Поиск пространственного

положения ее трассы с учетом выполнения данных требований направлен на обеспечение безопасности, надежности и экономической эффективности строительства и эксплуатации дороги. Он представляет собой сложную многокритериальную и многоэкстремальную оптимизационную задачу с нелинейными ограничениями и целевой функцией. В теории оптимизации нет надежных методов решения таких задач, кроме полного перебора вариантов и динамического программирования. Однако данные методы не применимы для решения

задач большой размерности, к которым и относится поиск оптимальной трассы железной дороги [1].

В разработанных математических моделях и методах решения рассматриваемой задачи [1–8] для сокращения ее размерности используется или начальное приближение плана трассы, или магистральный ход. Проектировщик прокладывает их на моделях местности через опорные пункты и фиксированные точки трассы, используя классический графоаналитический метод трассирования, реализованный на 2D-проекциях плана и продольного профиля железной дороги [9, 10]. Несмотря на то что данный метод не позволяет эффективно использовать возможности современных вычислительных средств и динамической визуальной аналитики, в САПР железных дорог он является базовым [11–14].

Применение классического метода трассирования в автоматизированном проектировании сопряжено со следующими проблемами:

1. Трассирование выполняется в проекциях плана и продольного профиля раздельно и не дает целостного пространственного восприятия положения трассы, что затрудняет его оценку на сложных участках пересеченного рельефа, так как проектировщик не получает мгновенного визуального отклика на изменения параметров трассы в 3D-пространстве, он анализирует их только после завершения очередной итерации проектирования.

2. Трудоемкость итераций при изменении положения трассы, в процессе которых требуется повторное выполнение следующих действий: а) построение плана трассы; б) корректировка продольного профиля с учетом размещения водопропускных сооружений и раздельных пунктов; в) расчет объемов земляных работ; г) технико-экономическая оценка измененного положения трассы.

3. Большое количество ручных и полуавтоматических операций повышает вероятность ошибок и усиливает влияние квалификации и опыта проектировщика на результат.

4. Ограниченные возможности вариативного трассирования в режиме реального времени, так как сравнение вариантов трассы требует последовательного расчета ее показателей и часто сопряжено с применением различных программных комплексов с ограниченной совместимостью обменных форматов, что значительно затрудняет оперативную оценку проектных решений.

5. Временной разрыв между изменением параметров трассы, расчетами ее показателей и их графической и аналитической визуализацией, так как вычисления и вывод их результатов являются раздельными последовательными этапами, тогда как интерактивное проектирование требует их интеграции в едином процессе.

6. Недостаточная наглядность при трассировании в условиях горного и пересеченного рельефа местности, так как использование классического метода трассирования не дает возможности оперативно оценить коэффициент развития трассы, соотношение уклонов местности и проектных уклонов, их соответствие нормативным требованиям.

Таким образом, в сложных условиях местности вариативный поиск даже начального приближения плана трассы с помощью существующей технологии автоматизированного трассирования железных дорог может быть связан с большими непроизводительными затратами времени [14], так как инженер вынужден выполнять большое количество итераций, варьируя параметры трассы и оценивая полученные в результате этих изменений технические, экономические и эксплуатационные показатели.

Интерактивные методы трассирования

В работах [11–16] предложены основные направления совершенствования методов трассирования для повышения эффективности автоматизированного проектирования железных дорог. Одно из таких направлений — разработка интерактивных методов трассирования на цифровой модели местности (ЦММ). Эти методы основаны на интеграции аналитических расчетов с визуализацией их результатов в режиме реального времени.

Разрабатываемые методы призваны решать несколько задач. Во-первых, они позволяют оперативно оценивать пространственное положение трассы при обходе или пересечении участков со сложным рельефом, а также с особыми природными и техногенными условиями. Во-вторых, с их помощью можно разделять магистральный ход на вольные и напряженные участки — в том числе на отрезки со сложными условиями местности. Это помогает сократить размерность задачи поиска оптимального положения трассы: уменьшается пространственный диапазон варьирования и сокращается число оптимизируемых параметров. В-третьих, методы дают возможность определять конкурентные варианты трассы, ко-

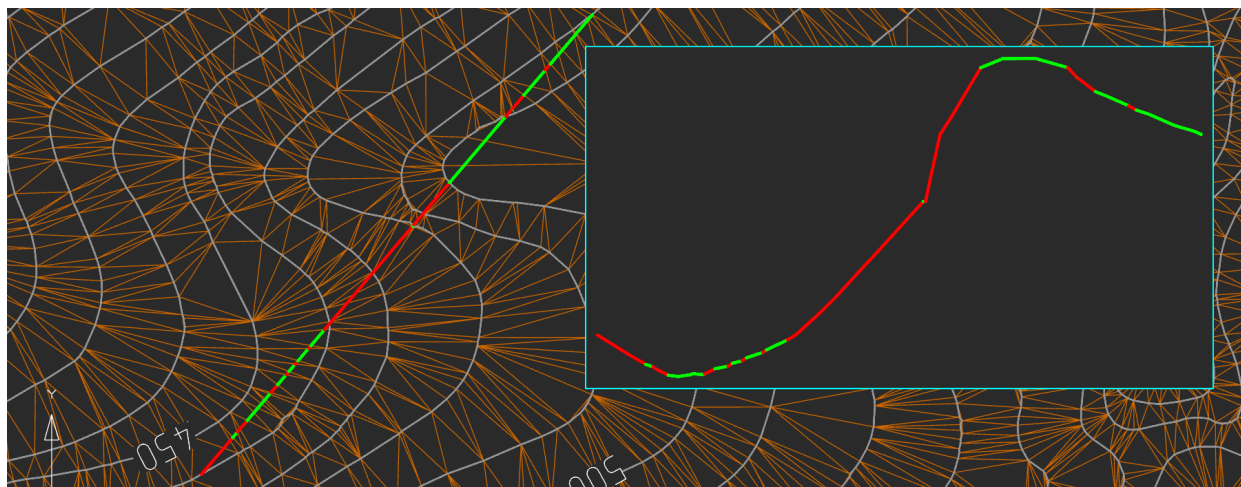
торые затем используются как исходные данные для последующей оптимизации.

В предлагаемых методах обратная связь с проектировщиком обеспечивается посредством интуитивно понятных инструментов визуальной аналитики — цветовой индикации и «приборной панели». В процессе автоматизированного трассирования они отображают в режиме реального времени необходимые для оценки пространственного положения трассы автоматически вычисляемые значения параметров и технико-экономических показателей.

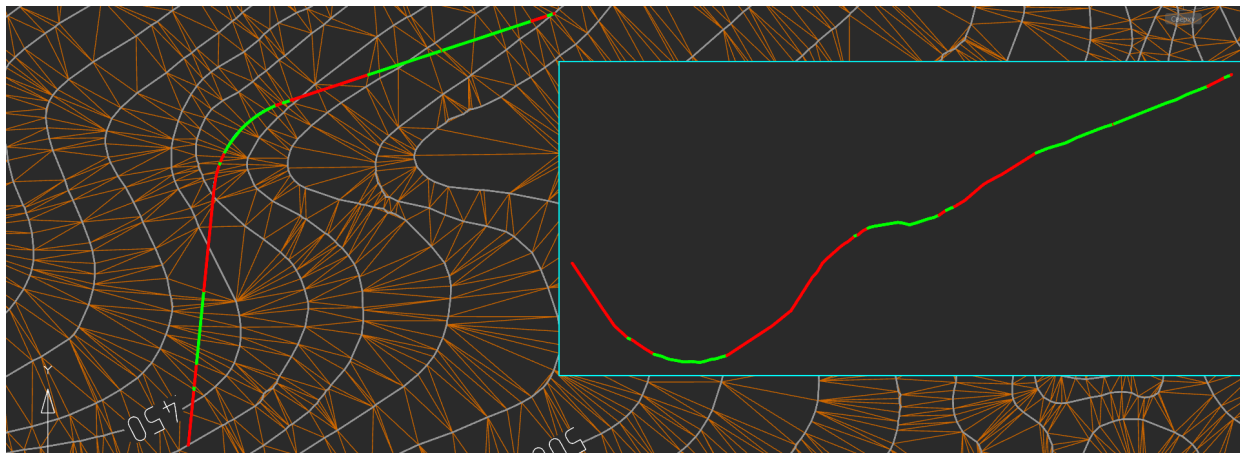
Цветовая индикация применяется для визуализации 3D-моделей участков трассы. Если средний уклон местности и уклон трассы на участке не превышают ограничивающий, то он выводится на экран монитора зеленым цветом, в противном случае — красным (рис. 1).

Математическая модель данного инструмента основана на аналитической геометрии. Она используется для определения положения точек пересечения ребер триангуляции TIN-модели рельефа с вертикальной поверхностью трассы, которая состоит из вертикальных плоскостей, проходящих через прямые участки и хорды кривых [13]. По координатам и высотам

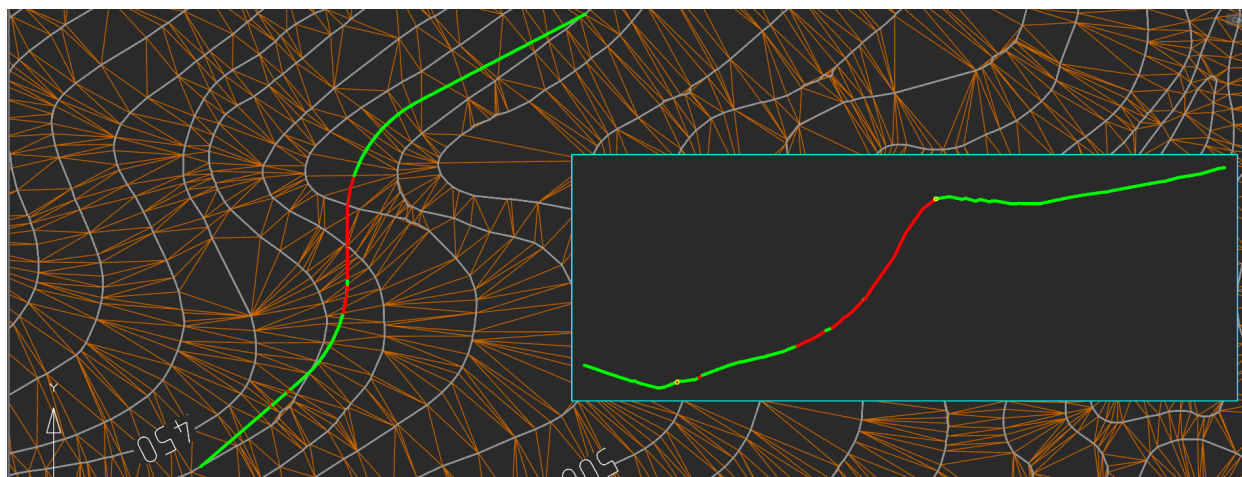
a



б



в



г

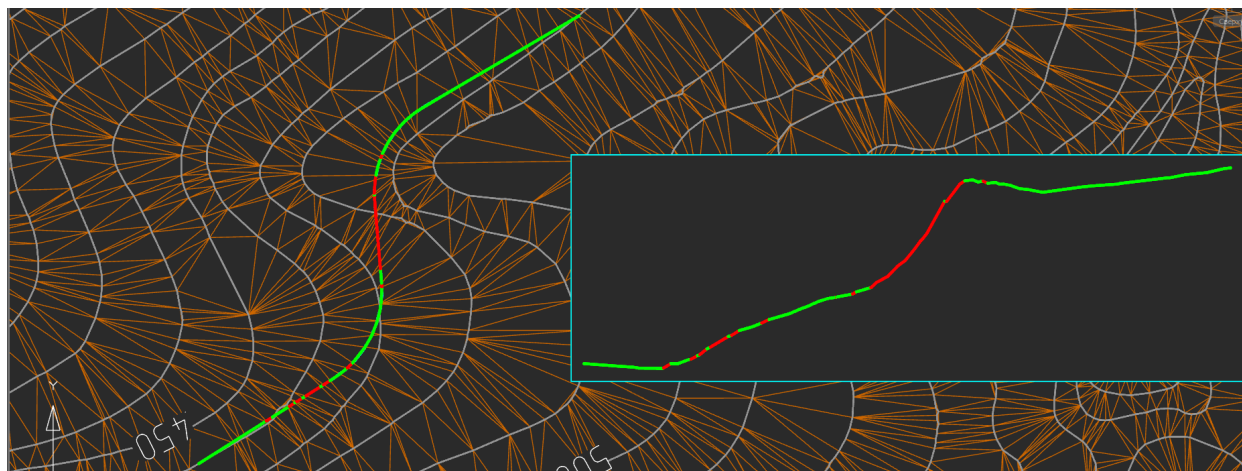


Рис. 1. Цветовая индикация участков плана трассы и продольного профиля земли

данных точек вычисляется средний уклон поверхности земли на каждом участке трассы между ребрами триангуляции:

$$i_{cp} = (H_2 - H_1) / \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

По результатам сравнения i_{cp} с ограничивающим уклоном выбирается цвет индикации участков трассы, строятся ее план и продольный профиль земли по трассе (рис. 1), рассчитываются значения ключевых показателей, выводимых на «приборную панель» для оценки трассировочного решения.

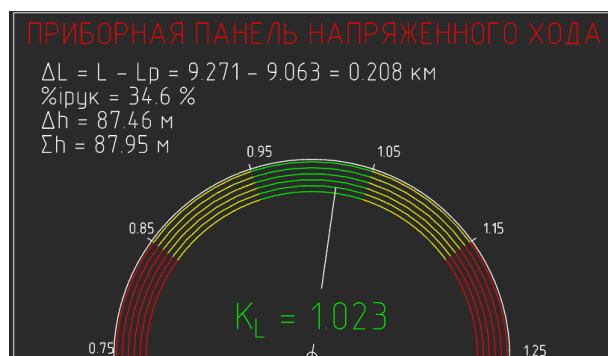
На рис. 1 показаны фрагменты интерактивного трассирования дороги через лог и водораздел на местности с пересеченным рельефом. При изменении положения трассы на ЦММ выполняется алгоритм реализации метода, приведенный в [13], участки плана трассы и продольного профиля земли отображаются на экране цветом, соответствующим результатам сравнения i_{cp} с ограничивающим уклоном.

На «приборные панели» (рис. 2) выводятся значения ключевых показателей, по которым проектировщик может оценить положение трассы в целом, на участках вольных и напряженных ходов, с пересеченным рельефом местности, а также ее фиксированных точек при об-

ходе или пересечении контурных и высотных препятствий. К ним относятся длина трассы, коэффициент ее развития, удельный вес напряженных ходов, процент использования руководящего уклона, сумма преодолеваемых высот, строительная стоимость, время хода пары грузовых поездов в четном и нечетном направлениях и другие технические, экономические и эксплуатационные показатели, используемые для оценки проектных решений. На данном этапе исследований проводятся эксперименты вариативного трассирования в системах автоматизированного проектирования (САПР) для разработки системы критериев принятия решений и информационных моделей «приборных панелей».

В рамках проводимых экспериментов на «приборную панель» напряженного хода (рис. 2а) выводятся расчетная длина L_p , необходимая для преодоления трассой превышения Δh между начальной и конечной точками хода, длина трассы L на данном участке, разность $\Delta L = L - L_p$, соотношение $K_L = L/L_p$, удельный вес (% $i_{рук}$) уклонов земной поверхности на участке хода, превышающих уклон трассирования, сумма превышений между точками с минимальной и максимальной отметками земли локальных высотных препятствий $\sum h$.

а



б

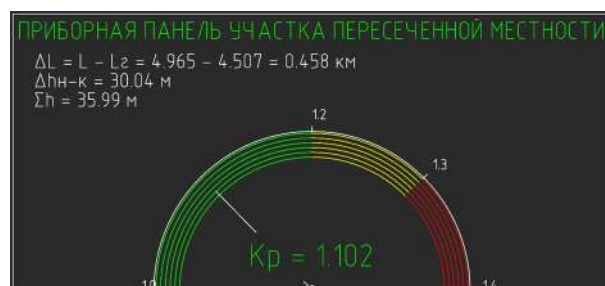


Рис. 2. «Приборные панели» со значениями ключевых показателей

На «приборной панели» участка с пересеченным рельефом местности (рис. 2б) отображаются длина геодезической линии L_{Γ} , соединяющей его начальную и конечную точки, удлинение трассы относительно геодезической линии $\Delta L = L - L_{\Gamma}$ и коэффициент ее развития в границах участка $K_p = L/L_{\Gamma}$, превышение $\Delta h_{н-к}$ между начальной и конечной точками участка, сумма превышений $\sum h$ между точками поверхности земли, расположенными на минимальных отметках отрицательных форм рельефа и максимальных отметках положительных форм.

Применение цветовой индикации и «приборных панелей» на напряженных ходах и участках с пересеченным рельефом местности дает возможность проектировщику с меньшим числом итераций оперативно проанализировать варианты возможных трассировочных решений и назначить для последующей оптимизации исходный план трассы и диапазон варьирования.

При обходе или пересечении трассой контурных или высотных препятствий предлагается применять интерактивный метод выбора положения фиксированных точек. Он основан на вариативном поиске пространственного положения трассы с использованием информационной инженерной цифровой модели местности (ИИЦММ) и библиотеки конструктивно-технических решений (БКТР) по типовым устройствам и сооружениям железной дороги [17].

Исходные данные ИИЦММ включают:

- цифровую модель рельефа;
- инженерно-геологические условия (тип и несущая способность грунтов, глубина залегания слабых слоев);
- гидрологические характеристики (водотоки, заболоченные участки, уровни грунтовых вод);

- существующую застройку и ограничения землепользования;
- транспортную инфраструктуру и коммуникации;
- экологические и санитарно-защитные зоны.

БКТР содержит структурированную информацию о типовых элементах железнодорожной инфраструктуры (поперечные профили земляного полотна, эстакады, путепроводы, подпорные сооружения, водопропускные сооружения, элементы верхнего строения пути и др.) с указанием их конструктивных, стоимостных и эксплуатационных характеристик [17]. Для каждого элемента в библиотеке задаются удельная строительная стоимость сооружения и нормативы эксплуатационных расходов на его содержание.

Выбор положения фиксированной точки с помощью предлагаемого метода выполняют в два этапа. На первом — трассируют два «крайних» варианта (рис. 3), которые определяют границы области допустимых проектных решений. В примере на рис. 3 первый вариант трассы пересекает препятствие (глубокий лог) по прямой (рис. 3а), второй — через фиксированную точку (рис. 3б), положение которой находят из условия:

$$P_2 = P_1 \pm \delta \cdot P_1,$$

где P_1 , P_2 — приведенные строительно-эксплуатационные затраты по 1-му и 2-му вариантам;

δ — погрешность расчета приведенных строительно-эксплуатационных затрат.

На втором этапе в пределах области допустимых проектных решений последовательно назначают несколько промежуточных вариантов, для которых с учетом условий местности и норм проектирования выбирают из БКТР типовые конструкции сооружений и выполняют

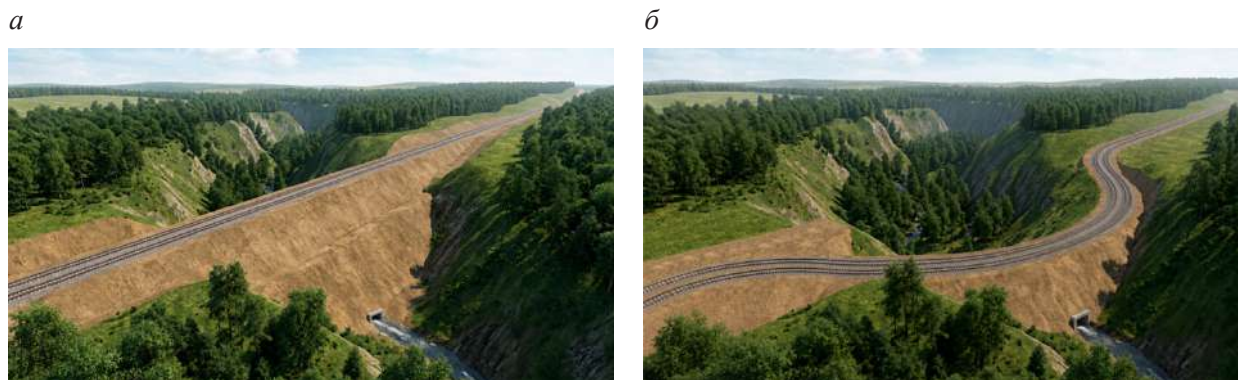


Рис. 3. Интерактивный выбор положения фиксированных точек на вольных ходах

расчет приведенных строительно-эксплуатационных затрат:

$$П_i = C_{\text{зп}} + \sum(C_i \cdot L_i) + E_{\text{экс}},$$

где $C_{\text{зп}}$ — строительная стоимость земляного полотна;

C_i — удельная строительная стоимость i -го конструктивного решения;

L_i — его протяженность;

$E_{\text{экс}}$ — приведенные эксплуатационные затраты на содержание устройств и сооружений участка железной дороги и передвижение поездов.

Таким образом, каждый вариант получает экономическую оценку, учитывающую местные условия и применение типовых конструктивно-технологических решений. На «приборной панели» выбора фиксированных точек отображаются показатели граничных вариантов и промежуточного варианта с минимальным значением $П_i$, который идентифицируется на ИИЦММ посредством цветовой индикации как наилучший из рассмотренных. Вблизи найденного решения уточняется положение фиксированной точки и формируется новый вариант. Процесс повторяется до достижения устойчивого минимума целевой функции.

В результате последовательного интерактивно управляемого поиска положения фиксированной точки выбирается тот вариант, который обеспечивает наименьшие приведенные строительно-эксплуатационные затраты при соблюдении технических норм.

Предлагаемый интерактивный метод выбора положения фиксированных точек обеспечивает:

- переход от технического сравнения вариантов к количественной экономической оценке на ранней стадии проектирования;
- объективизацию выбора положения фиксированных точек;
- сокращение количества необоснованных итераций;
- повышение качества проектных решений на основе минимизации приведенных строительно-эксплуатационных затрат.

В отличие от традиционного подхода трассирования при обходе или пересечении трассой контурных или высотных препятствий, при котором оценка выполняется после детальной проработки каждого варианта, предлагаемый метод позволяет проводить интерактивный экспресс-анализ и направленно сужать область поиска оптимального решения.

Использование цветовой индикации при трассировании железных дорог на ИИЦММ направлено на сокращение количества затратных итераций полного перерасчета вариантов.

В качестве эффективного способа визуальной фильтрации по пороговому критерию на данный момент для отображения трассы применяется цветовая дихотомия зеленого и красного. В дальнейшем предполагается расширить шкалу: добавить желтый диапазон, сигнализирующий об участках «близких к порогу», градиент (плавный переход цвета от красного к зеленому), или использовать независимые цвета для разных ограничений (радиусы кривых, длины переходных кривых, длины прямых вставок, охранные зоны, экологические ограничения и др.). Такой подход близок к принципам многослойной визуализации инженерных ограничений в цифровых моделях.

Заключение

Разработанные интерактивные методы трассирования железных дорог на ЦММ обеспечивают технологичное сочетание аналитических расчетов показателей трассы с их наглядной визуализацией на экране монитора. Благодаря использованию цветовой индикации инженер получает интуитивно понятное представление о пространственном положении трассы, что помогает ему оперативно принимать решения и снижает вероятность ошибок.

Реализация предлагаемых методов в САПР железных дорог позволит также перейти от применения классических графоаналитических методов определения положения трассы в плоских проекциях к интерактивному пространственному проектированию на трехмерных визуальных ИИЦММ.

Методы могут служить основой для создания и внедрения интеллектуальных модулей трассирования в автоматизированном проектировании линейных сооружений. Их реализация на Python с использованием API интерфейса демонстрирует гибкость и открытость

современных САПР для прикладных инженерных задач.

Применение предлагаемых методов в автоматизированном проектировании железных дорог позволит снизить трудоемкость вариативного трассирования за счет сокращения количества итераций и времени их выполнения посредством интеграции расчетов с визуальным анализом в едином интерактивном процессе и обеспечения целостного трехмерного восприятия трассы в пространстве, что также уменьшит вероятность инженерных ошибок при оценке проектных решений на сложных участках пересеченного рельефа местности.

Список источников

1. Струченков В. И. Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений. М.: СОЛОН-Пресс, 2013. 272 с.
2. Турбин И. В. Основы системы машинного трассирования на косогорных участках напряженного хода // Труды МИИТ. Вопросы повышения качества и эффективности проектных решений железных дорог. 1978. Вып. 614. С. 21–25.
3. Анисимов В. А. Численные методы выбора положения трассы на участке напряженного хода // Труды МИИТ. 1982. Вып. 715. С. 98–107.
4. Струченков В. И. Основы теории и методы оптимизации трасс железных дорог и других линейных объектов: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВНИИ трансп. строительства, 1985. 405 с.
5. Шейдвассер Д. М. Оптимизация трасс железных дорог на напряженных ходах // Автоматизация проектирования объектов транспортного строительства. М.: Транспорт, 1986. С. 16–29.
6. Понарин А. С. Сплайновые математические модели в трассировании железных дорог. Екатеринбург: Диамант, 1996. 229 с.
7. Богданов А. И. Общая модель плана и профиля для автоматизированного проектирования новых

и реконструируемых железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63, № 3. С. 142–148.

8. Bogdanov A. I. General Model and Method of Computer-Aided Design of the Plan and Profile of New And Reconstructed Railways // Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration: Proceedings of the International Conference. Beijing, 2024. Pp. 194–206.

9. Изыскания и проектирование железных дорог: в 2 т. / А. В. Горинов [и др.] М.: Транспорт, 1979. Т. 1. 320 с.

10. Копыленко В. А. Изыскания и проектирование железных дорог. М.: УМЦ ЖДТ, 2021. 690 с.

11. Лисицын И. М. Совершенствование методов автоматизированного проектирования трассы железной дороги: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПС (МИИТ), 2007. 136 с.

12. Бучкин В. А. Программные разработки компании Real Geo Project // САПР и графика. 2008. № 9. С. 42–44. URL: <https://sapr.ru/article/19514> (дата обращения: 21.06.2026).

13. Анисимов В. А., Пренинг Р. Д. Совершенствование математического обеспечения оптимального трассирования железных дорог в условиях пересеченного рельефа местности // Транспорт Российской Федерации. 2025. № 6 (121). С. 55–60.

14. Анисимов В. А., Рубцов М. А. Метод интерактивного трассирования новой железной дороги

на цифровой модели местности // Транспорт Российской Федерации. 2026. № 2 (123). С. 27–30.

15. Кулажский А. В. Цифровое и математическое моделирование рельефа местности в системах автоматизированного проектирования трасс железных дорог: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПС (МИИТ), 2011. 120 с.

16. Дюкарев Л. А. Совершенствование методов анализа проектных решений при интерактивном трассировании железных дорог: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПС (МИИТ), 2012. 137 с.

17. Анисимов В. А., Булакаева О. С., Шкурников С. В. Функциональная модель системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 4. С. 117–130.

Дата поступления: 25.05.2026

Решение о публикации: 04.08.2026

Контактная информация:

АНИСИМОВ Владимир Александрович — доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; anisvl@mail.ru

РУБЦОВ Максим Алексеевич — аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; maksim.rubcov@inbox.ru

Improving Methods of Computer-Aided Design of Railway Routes Based on the Use of Visual Analytics

V. A. Anisimov, M. A. Rubtsov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Anisimov V. A., Rubtsov M. A. Improving Methods of Computer-Aided Design of Railway Routes Based on the Use of Visual Analytics // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 614–624. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-614-624 (In Russian)*

Abstract

Objective: to improve methods of computer-aided design of railway routes based on the use of visual analytics. **Methods:** mathematical modeling, visual analysis, and optimization methods were applied. **Results:** the problems associated with using the classical grapho-analytical alignment method in the automated design of railways were examined. Interactive alignment methods based on a digital terrain model are proposed, leveraging the technological integration of analytical calculations and the visualization of their results in real time. The implementation of the proposed methods will make it possible to switch from traditional graphoanalytical railway design in separate projections of the plan and the longitudinal profile of the route to interactive spatial tracing. **Practical significance:** the use of these methods in computer-aided railway design will allow for a visual rapid assessment of design solutions, which will reduce the complexity of variable tracing by reducing the number of iterations and the time to complete them.

Keywords: railway route, automated tracing, digital terrain model, visual analytics, interactive method

References

1. Struchenkov V. I. Metody optimizatsii trass v SAPR lineynykh sooruzheniy [Methods of Route Optimization in CAD for Linear Structures], Moscow, SOLON-Press, 2013, 272 p. (In Russian)
2. Turbin I. V. Osnovy sistemy mashinnogo trassirovaniya na kosogornykh uchastkakh napryazhennogo khoda [Fundamentals of the Machine Routing System on Sloping Sections of Steep Gradients], *Trudy MIIT. Voprosy povysheniya kachestva i effektivnosti proektnykh resheniy zheleznnykh dorog* [Proceedings of MIIT. Issues of Improving the Quality and Efficiency of Railway Design Solutions], 1978, iss. 614, pp. 21–25. (In Russian)
3. Anisimov V. A. Chislennyye metody vybora polozheniya trassy na uchastke napryazhennogo khoda [Numerical Methods for Selecting the Route Position on a Steep Gradient Section], *Trudy MIIT [Proceedings of Russian University of Transport]*, 1982, iss. 715, pp. 98–107. (In Russian)
4. Struchenkov V. I. Osnovy teorii i metody optimizatsii trass zheleznnykh dorog i drugikh lineynykh ob"ektov [Fundamentals of the Theory and Methods for Optimizing Routes of Railways and Other Linear Objects]. Doctor of Engineering Sciences diss. Moscow: VNII transportnogo stroitelstva [All-Russian Research Institute of Transport Construction], 1985, 405 p. (In Russian)
5. Sheidvashser D. M. Optimizatsiya trass zheleznnykh dorog na napryazhennykh khodakh [Optimization of Railway Routes on Steep Gradients], *Avtomatizatsiya proektirovaniya obektov transportnogo stroitelstva* [Automation of Design of Transport Construction Objects], Moscow, Transport, 1986, pp. 16–29. (In Russian)
6. Ponarin A. S. Splaynovyye matematicheskie modeli v trassirovanii zheleznnykh dorog [Spline Mathematical Models in Railway Route Design], Yekaterinburg, Diamant, 1996, 229 p. (In Russian)
7. Bogdanov A. I. Obshchaya model plana i profilya dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya novykh i rekonstruiemykh zheleznnykh dorog [General Model of Plan and Profile for Computer-Aided Design of New and Reconstructed Railways], *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, vol. 63, no. 3, pp. 142–148. (In Russian)
8. Bogdanov A. I. General Model and Method of Computer-Aided Design of the Plan and Profile of New and Reconstructed Railways, Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration, Proceedings of the International Conference, Beijing, 2024, pp. 194–206.
9. Gorinov A. V., et al. Izyskaniya i proektirovanie zheleznnykh dorog. V 2 tomakh. [Railway Surveys and Design. In 2 vols.] Moscow, Transport, 1979, vol. 1, 320 p. (In Russian)

10. Kopylenko V. A. Izyskaniya i proektirovanie zheleznykh dorog [Railway Surveys and Design]. Moscow, UMC ZHDT [Educational and Methodological Center for Railway Transport], 2021, 690 p. (In Russian)
11. Lisitsyn I. M. Sovershenstvovanie metodov avtomatizirovannogo proektirovaniya trassy zheleznoy dorogi [Improving Methods of Computer-Aided Railway Route Design]. Candidate of Engineering Sciences diss. Moscow, MGUPS (MIIT) [Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)], 2007, 136 p. (In Russian)
12. Buchkin V. A. Programmnye razrabotki kompanii Real Geo Project [Software Developments by Real Geo Project], *SAPR i grafika [CAD and Graphics]*, 2008, no. 9, pp. 42–44. URL: <https://sapr.ru/article/19514> (accessed: June 21, 2026). (In Russian)
13. Anisimov V. A., Prening R. D. Sovershenstvovanie matematicheskogo obespecheniya optimalnogo trassirovaniya zheleznykh dorog v usloviyakh peresechennogo reliefa mestnosti [Improving the Mathematical Support for Optimal Railway Routing in Hilly Terrain], *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2025, no. 6 (121), pp. 55–60. (In Russian)
14. Anisimov V. A., Rubtsov M. A. Metod interaktivnogo trassirovaniya novoy zheleznoy dorogi na tsifrovoy modeli mestnosti [Method of Interactive Routing of a New Railway on a Digital Terrain Model], *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2026, no. 2 (123), pp. 27–30. (In Russian)
15. Kulazhskiy A. V. Tsifrovoye i matematicheskoye modelirovanie reliefa mestnosti v sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya trass zheleznykh dorog [Digital and Mathematical Modeling of Terrain in Computer-Aided Railway Route Design Systems]. Candidate of Engineering Sciences diss. Moscow, MGUPS (MIIT) [Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)], 2011, 120 p. (In Russian)
16. Dyukarev L. A. Sovershenstvovanie metodov analiza proektnykh resheniy pri interaktivnom trassirovanii zheleznykh dorog [Improving Methods for Analyzing Design Solutions in Interactive Railway Routing]. Candidate of Engineering Sciences diss. Moscow, MGUPS (MIIT) [Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)], 2012, 137 p. (In Russian)
17. Anisimov V. A., Bulakaeva O. S., Shkurnikov S. V. Funktsionalnaya model sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya zheleznykh dorog v informatsionno-tsifrovoy srede [Functional Model of a Computer-Aided Railway Design System in an Information and Digital Environment], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2022, iss. 4, pp. 117–130. (In Russian)

Received: May 25, 2026

Accepted: August 04, 2026

Author's information:

Vladimir A. ANISIMOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the “Railway Surveys and Design” Department; anisvl@mail.ru

Maksim A. RUBTSOV — Postgraduate Student of the “Railway survey and design” Department; maksim.rubcov@inbox.ru

УДК 629.4.063.7

Совершенствование системы автоматического смазывания гребней колесных пар с учетом условий эксплуатации локомотива

К. А. Московских, П. Ю. Иванов, И. А. Кудьяров, Е. Ю. Дульский

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

Для цитирования: *Московских К. А., Иванов П. Ю., Кудьяров И. А., Дульский Е. Ю.* Совершенствование системы автоматического смазывания гребней колесных пар с учетом условий эксплуатации локомотива // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 625–634. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-625-634

Аннотация

Цель: изучить проблему повышенного износа гребней колесных пар у электровозов подталкивающего движения; проанализировать недостатки автоматического гребнесмазывателя АГС8.10М2; определить, как климат влияет на подачу смазки гребнесмазывателем; описать принцип работы и устройство адаптивного автоматического гребнесмазывания; провести математическое моделирование процесса нанесения смазки на участке Большой Луг — Слюдянка-2 при скорости 60 км/ч. **Методы:** сравнение характеристик смазывающего материала, используемого на АГС8.10М2, в зависимости от температуры; математическое моделирование на участке Большой Луг — Слюдянка-2 при скорости 60 км/ч с применением разных алгоритмов подачи смазки и варьированием массы подаваемого материала. **Результаты:** установлено, что наиболее распространенный дефект колесных пар — износ гребней у электровозов подталкивающего движения. Анализ физических свойств смазочного материала, который используется на АГС8.10М2, показал значительное изменение его вязкости при колебаниях температуры. Предложено устройство с адаптивным управлением подачи смазки. Оно учитывает особенности эксплуатации локомотива (движение по кривым и прямым участкам пути) и обеспечивает стабильное смазывание в зимний период за счет поддержания оптимальной температуры смазки. Моделирование продемонстрировало, что адаптивный принцип управления подачей смазки сокращает длину «сухого рельса» и расход смазочного материала по сравнению с классическим принципом, который реализован на АГС8.10М2. **Практическая значимость:** результаты моделирования подтверждают, что адаптивные системы гребнесмазывания целесообразно применять для повышения эффективности лубрикации колесных пар и снижения износа их гребней.

Ключевые слова: автоматический гребнесмазыватель, вязкость, моделирование, принцип управления подачей смазки, удельная масса смазки, «сухой рельс»

Введение

Износ колесных пар подвижного состава и рельсов — одна из важнейших проблем железнодорожного транспорта. Этой проблематике посвятили свои труды многие ученые и специалисты в области железнодорожного транспорта [1–5].

На процесс износа существенно повлияли два фактора:

- переход с подшипников скольжения на подшипники качения, который привел к заметному ускорению износа гребней колесных пар;
- уменьшение ширины колеи с 1524 до 1520 мм, что повысило нагрузки на систему

«колесо — рельс» и способствовало увеличению износа [6].

Согласно стратегии развития ОАО «РЖД» до 2030 года, планируется рост объема перевозок и увеличение нагрузки на ось колесной пары. Это приведет к повышению грузонапряженности подвижного состава [7].

Износ гребней колесных пар — наиболее распространенный тип дефектов среди повреждений железнодорожных колес. Он возникает вследствие контактного взаимодействия колеса и рельса [8].

Практика показывает, что наибольший износ гребней колесных пар наблюдается у локомотивов подталкивающего движения, которые эксплуатируются на горноперевальных участках с большим количеством кривых, подъемов и спусков. У таких локомотивов также встречается неравномерный износ бандажей колесных пар — в частности, из-за износа гребня при вписывании во внешнюю кривую.

Проблему решают путем отправки локомотива на станцию для разворота. Для локомотивов подталкивающего движения на участке Большой Луг — Слюдянка-2 Восточно-Сибирской железной дороги эта операция занимает 4 часа и проводится дважды в месяц.

Устранение износа гребня — дорогостоящее мероприятие: для восстановления профиля гребня при обточке колесной пары приходится значительно сточить бандаж.

Сегодня основные способы снижения износа гребней колесных пар — это повышение твердости (путем термического упрочнения либо нанесения износостойких покрытий) и лубрикация.

Термическое упрочнение — наиболее современный и перспективный метод снижения износа [9–11]. Однако он отличается высокой стоимостью и недостаточно изучен с точки зрения влияния на ресурс рельса. Поэтому на те-

кущий момент наиболее доступным способом снижения износа остается лубрикация [12–14].

Наибольшее распространение для снижения износа гребней колесных пар локомотивов получил бортовой автоматический гребнесмазыватель АГС8.10М2 [15]. Принцип подачи смазки на гребень колесной пары состоит в подаче сжатого воздуха в камеру форсунки, содержащую смазку, и выдавливании ее через форсунку на гребень бандажа колесной пары, при этом из-за высокого давления происходит ее разбрызгивание. Подачей сжатого воздуха управляет электропневматический вентиль, получающий сигналы от блока управления. Смазка поступает в форсунку постоянно — под давлением питательной магистрали.

Анализ работы гребнесмазывателя АГС8.10М2 позволил выявить ряд недостатков:

1. Отсутствие адаптивного регулирования подачи смазки в зависимости от скорости движения локомотива. Согласно паспортным данным, при увеличении скорости растет интервал между циклами смазывания, и, как следствие, снижается удельная масса смазки, подаваемой на гребень колесной пары. При этом временные циклы подачи смазки остаются неизменными. В результате локомотив движется по «сухому рельсу» — участку, на котором удельная масса смазки составляет менее 5 % от максимального значения на метр (это пороговое значение, при котором смазка на колесе фактически отсутствует).

2. Неучет особенностей плана пути при дозировании смазки. АГС8.10М2 подает одинаковый объем смазки на прямых участках и при прохождении криволинейных отрезков пути, где износ гребней наиболее интенсивен. В кривых сила трения в паре «гребень бандажа колесной пары — боковая грань головки рельса» резко возрастает под действием центробежной силы, что ускоряет износ. Таким

образом, устройство расходует смазку неэффективно: в зонах с минимальным износом и в зонах с его максимальными значениями [16].

В условиях эксплуатации железных дорог РФ системы гребнесмазывания работают в широком диапазоне температур окружающей среды. При понижении температуры вязкость полужидких смазочных материалов существенно возрастает. Это приводит к ухудшению условий дозирования, увеличению времени заполнения дозирующих камер форсунок, снижению фактического количества смазки, поступающей в зону контакта.

В настоящее время в АГС8.10М2 используется полужидкая смазка «Пума-МГ». Согласно паспортным данным, ее вязкость увеличивается в 32 раза при сравнении динамической вязкости при $+20^{\circ}\text{C}$ и динамической вязкости в среднем градиенте скорости деформации 10 c^{-1} при -30°C (рис. 1).

Повышение вязкости замедляет движение смазки по трубопроводам и значительно снижает скорость ее подачи в форсунку. В итоге стабильность режима смазывания нарушается, особенно в зимний период эксплуатации. Это

подтверждает необходимость использования систем гребнесмазывания с климатическим исполнением: они позволяют поддерживать температуру смазочного материала в оптимальных пределах.

Таким образом, для снижения износа гребней колесных пар необходимо усовершенствовать алгоритмы гребнесмазывания в системе АГС8.10М2, а также обеспечить поддержание физических характеристик смазочного материала в зимний период.

Предлагаемый принцип адаптивного управления подачей смазки на гребни колесных пар

Адаптивный принцип управления подачей смазки на гребни колесных пар будет работать в автоматическом режиме. Перед кривым участком пути по загруженным координатам из бортовой системы будет подаваться сигнал на блок управления о начале работы. При вписывании в кривой участок пути удельный объем смазки подается на внешнюю нить кривой. На внутреннюю нить удельный объем смазки не подается. Интервалы подачи сигнала с блока

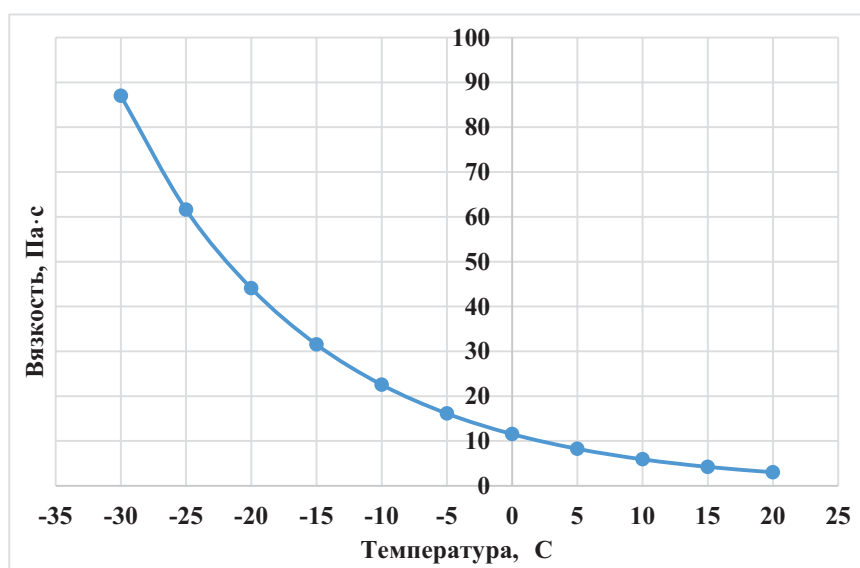


Рис. 1. Зависимость изменения вязкости смазки «Пума-МГ» от температуры

управления на электропневмовентили зависят от скорости прохождения кривой пути. После прохождения кривого участка пути подача сигнала от бортовой системы на блок управления прекратится.

Для обеспечения подачи смазки индивидуально на каждую кривую предусмотрено добавление второго электропневмовентили. Форсунки закрепляются на кожухе зубчатой передачи для избегания попадания смазки на круг катания колеса.

Стабильность работы системы обеспечиваются специальные технические решения:

1. **Пневматические редукторы** поддерживают постоянное рабочее давление в баке для хранения смазки и на форсунках, что способствует стабилизации системы смазки.

2. **Термозлемент** поддерживает необходимые физические свойства смазки, обеспечивая работоспособность системы в зимний период за счет обогрева трубопроводов. Термозлемент подключается к трансформатору вспомогательной цепи локомотива.

Реализация описанного подхода позволит экономить смазку за счет дифференцированной подачи на левую и правую стороны колесной пары на криволинейных участках пути, а также обеспечит стабильность смазывания в зимний период за счет поддержания оптимальной температуры (и, как следствие, вязкости) смазочного материала.

Моделирование процесса нанесения смазки на гребни колесных пар при движении локомотива по участку Большой Луг — Слюдянка-2

Для оценки эффективности классического принципа управления подачей смазки (реализованного в АГС8.10М2) в сравнении с предложенным адаптивным принципом, было проведено математическое моделиро-

вание. Исследование проводилось на отдельном горно-перевальном участке Большой Луг — Слюдянка-2 при постоянной скорости локомотива 60 км/ч. Расчеты выполнялись в программе MS Excel и были направлены на определение удельной массы смазки, подаваемой на гребень колеса, длины «сухого рельса» и общего расхода смазки.

При работе по алгоритму АГС8.10М2 (согласно паспортным данным) процесс нанесения смазки осуществляется с чередованием 1 с подачи и 2,3 с паузы. Масса смазки, подаваемой с одной форсунки на колесо, составляет 3 г/м. При этом подача осуществляется одновременно двумя форсунками.

Адаптивный принцип управления подачей смазки предполагает другой режим: 1,5 с подачи и 1,8 с паузы. В этом случае масса смазки, подаваемой с одной форсунки на колесо, увеличивается до 6 г/м. При этом подача осуществляется только одной форсункой — на гребень колеса, взаимодействующий с внешним рельсом при вписывании в кривую.

Результаты моделирования нанесения смазки классическим принципом, реализованным в АГС8.10М2, представлены на рис. 2, а для адаптивного принципа подачи смазки — на рис. 3. Информация о плане пути приведена в виде горизонтальных линий красного и зеленого цвета, по ним можно проследить количество смазки, находящейся на гребне колеса при прохождении кривых и прямых участков.

Анализ результатов показывает, что при работе алгоритма АГС8.10М2 интенсивность подачи смазки остается неизменной на всем протяжении участка пути (рис. 2). В то же время адаптивный принцип позволяет существенно увеличить количество подаваемой смазки именно на криволинейных участках (рис. 3), что повышает эффективность смазывания в зонах наиболее интенсивного износа.

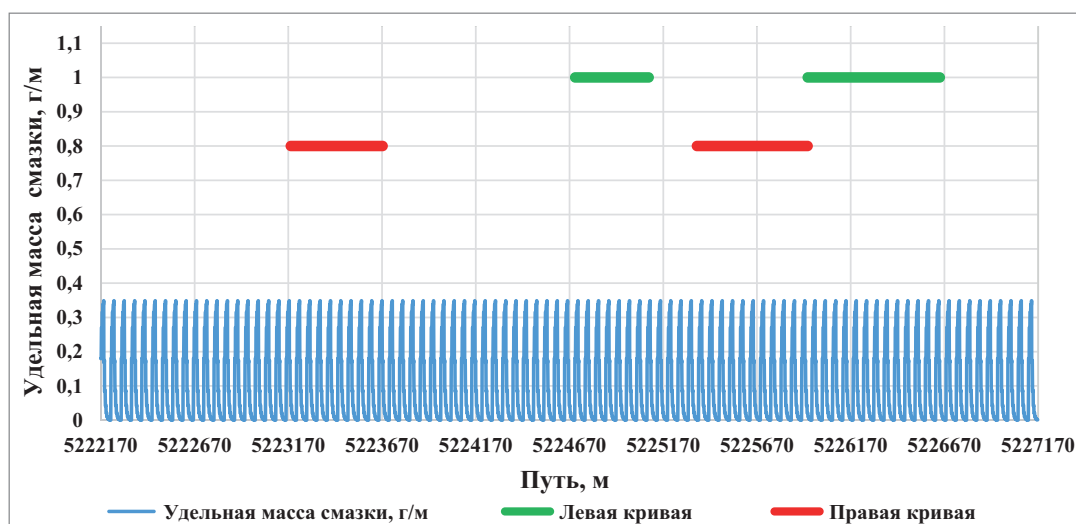


Рис. 2. Результаты моделирования процесса нанесения смазки АГС8.10М2 на фрагменте пути от 5222 км 170 м до 5227 км 170 м участка Большой Луг — Слюдянка-2 при скорости 60 км/ч

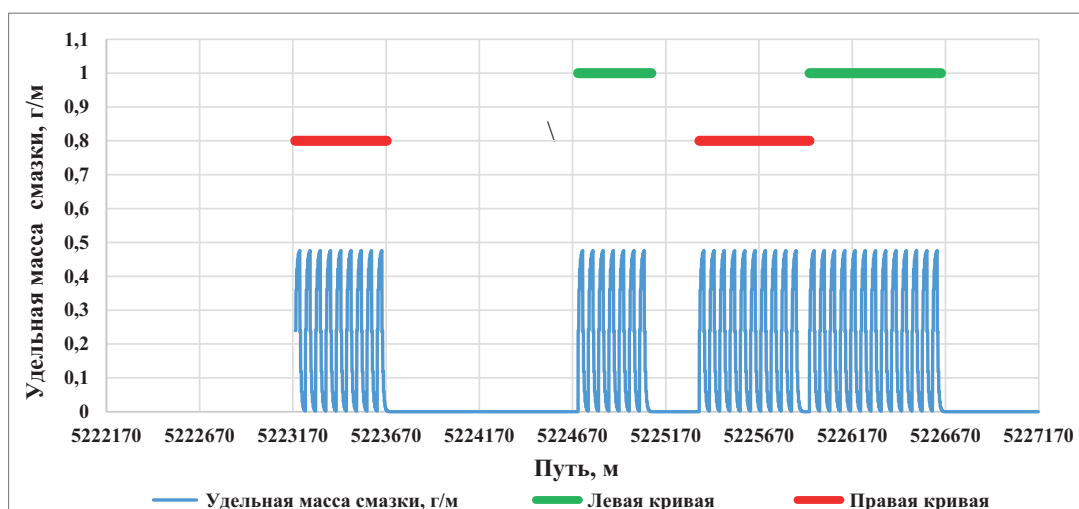


Рис. 3. Результаты моделирования процесса нанесения смазки с применением адаптивного принципа управления подачей в кривых на фрагменте пути от 5222 км 170 м до 5227 км 170 м участка Большой Луг — Слюдянка-2 при скорости 60 км/ч

Анализ результатов моделирования процесса нанесения смазки

Результаты моделирования показали, что автоматический гребнесмазыватель климатического исполнения с адаптивным принципом управления подачей смазки обеспечивает увеличенное количество смазки на колесо — до 0,47 г/м. При

использовании классического принципа управления подачей смазки максимальное количество смазки составляет 0,35 г/м, что на 34 % меньше, чем при адаптивном принципе.

Для определения наличия «сухого рельса» было принято пороговое значение — 5 % от максимальной удельной массы смазки на метр,

наносимой на гребень колесной пары. Расчеты выполнены для участка моделирования общей длиной 4476 м, из которых 2177 м приходится на криволинейные участки пути.

Анализ длины «сухого рельса» в криволинейных участках дал следующие результаты:

- при использовании АГС8.10М2 длина «сухого рельса» составила 958 м, а его доля в кривых достигла 44 %;
- при применении адаптивного автоматического гребнесмазывателя с климатическим исполнением длина «сухого рельса» сократилась до 696 м, а доля в кривых снизилась до 32 %.

На следующем этапе был проведен расчет расхода смазки для двух вариантов системы смазывания: классической (АГС8.10М2) и адаптивной автоматической гребнесмазывающей системы климатического исполнения.

Расход смазки определяется по формуле:

$$M_{\text{см}} = N_{\text{ф}} \cdot N_{\text{впр}} \cdot m_{\text{впр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ф}}$ — количество форсунок, шт;

$N_{\text{впр}}$ — количество впрысков одной форсунки, шт;

$m_{\text{впр}}$ — масса впрыска одной форсунки, г/м.

Расход смазки автоматическим гребнесмазывателем АГС8.10М2 при заданном алгоритме смазывания составляет:

$$M_{\text{см.АГС}} = 2 \cdot 82 \cdot 3 = 492 \text{ г.}$$

Расход смазки адаптивным автоматическим гребнесмазывателем с климатическим исполнением при заданном алгоритме смазывания составляет:

$$M_{\text{см.адапт}} = 1 \cdot 39 \cdot 6 = 234 \text{ г.}$$

Расход смазки при адаптивном управлении ее подачей снизился в 2,1 раза относительно расхода при классическом управлении. Аналогично был осуществлен расчет расхода смазки на всем участке Большой Луг — Слюдянка-2. Результаты моделирования сведены в таблицу.

Согласно данным таблицы, адаптивный принцип подачи смазки позволяет снизить расход смазочного материала на всем участке Большой Луг — Слюдянка-2 (при постоянной скорости 60 км/ч) в 1,3 раза по сравнению с классическим принципом подачи смазки (АГС8.10М2).

При анализе длины «сухого рельса» в криволинейных участках выявлено, что при использовании АГС8.10М2 она превышает показатель адаптивного принципа подачи смазки на 7871 м. Доля «сухого рельса» в кривых сохраняется на тех же уровнях, что и для рассмотренного ранее отдельного участка: 44 % — для АГС8.10М2, 32 % — для адаптивного принципа управления подачей смазки.

ТАБЛИЦА. Основные численные показатели процесса нанесения смазки на всем участке Большой Луг — Слюдянка-2 при скорости 60 км/ч

Наименование устройства	Общая длина участка моделирования, м	Длина кривых участков пути, м	Длина «сухого рельса» в кривых, м	Доля «сухого рельса» в кривых, %	Расход смазки на всем участке, г
АГС8.10М2	84 394	65 582	28 891	44	9276
Адаптивный принцип управления подачи смазки			21 020	32	7050

Эти результаты подтверждают перспективность внедрения адаптивной системы смазки гребней колес с климатическим исполнением для повышения эффективности эксплуатации железнодорожного подвижного состава на сложных участках пути, таких как горно-перевальный участок Большой Луг — Слюдянка-2.

Заключение

Один из самых распространенных на сегодняшний день автоматических гребнесмазывателей типа АГС8.10М2 имеет ряд недостатков, которые влияют на повышенный износ гребней колесных пар и рельса. Отсутствие климатического исполнения АГС8.10М2 приводит к непредсказуемому снижению количества подаваемой смазки вплоть до полного ее отсутствия при низких температурах, что обусловлено многократным повышением вязкости.

На замену классическому принципу подачи смазки предложен адаптивный принцип подачи смазки с применением климатического исполнения.

На основе моделирования процесса нанесения смазки на участке Большой Луг — Слюдянка-2 при скорости 60 км/ч установлено, что применение адаптивного алгоритма смазывания приводит к снижению длины «сухого рельса» в кривых участках пути с 44 до 32 %. Анализ расхода смазочного материала показал, что при работе предложенным устройством расход смазки на участке Большой Луг — Слюдянка-2 снижается в 1,3 раза по сравнению с классическим способом подачи, реализованным на гребнесмазывателе АГС8.10М2.

Такие решения позволят обеспечить стабилизацию подачи смазочного материала с учетом скорости движения и координат локомотива, снизить расход смазки, повысить ресурс колес локомотива и рельсов на кривых участ-

ках пути. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения адаптивных систем гребнесмазывания с климатическим исполнением.

Статья подготовлена в рамках государственного задания на выполнение научно-исследовательской работы № 1025032500106-9-2.1.3; 2.2.6.

Список источников

1. Буйносов А. П. Анализ процессов эксплуатационного износа гребней бандажей колесных пар электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 3. С. 79–84. EDN PASBDR
2. Воробьев А. А. Влияние механических и метрических свойств на износ и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава // Вестник ИрГТУ. 2010. № 4 (44).
3. Воробьев А. А., Котова В. В. Износ в системе «колесо — рельс» // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 3. С. 24–31.
4. Шалыгин М. Г., Ващишина А. П. Обзор причин интенсивного износа гребня колесной пары и способов его уменьшения // Механики XXI века. 2020. № 19. С. 202–207.
5. Буйносов А. П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава: монография. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2010. 224 с.
6. Глазунов Д. В. Способы снижения износа колесных пар подвижного состава // Известия УГТУ. 2019. Вып. 2 (54). С. 107–114. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-2-107-114
7. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105104?id=155> (дата обращения 09.04.2026).

8. Шмелев С. А., Богданов А. В. Современное состояние вопроса повреждаемости гребней колесных пар и методы снижения их износа и контактной усталости // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 9 (87). С. 14–20. EDN YMBJTF

9. Петров С. Ю., Костюкевич А. И., Рябов А. А. Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар // Мир транспорта. 2013. Т. 11, № 2 (46). С. 62–69.

10. Буйносов А. П., Пышный И. М. Увеличение ресурса бандажей колесных пар промышленных электровазос с помощью наплавки // Известия Транссиба. 2012. № 2 (10).

11. Буйносов А. П., Шепелева И. О. Увеличение ресурса колесных пар электровазос за счет плазменного упрочнения гребней бандажей // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 6. С. 182–185.

12. Марулин С. Л., Фетисова Н. Г., Буйносов А. П. Повышение ресурса бандажей колесных пар локомотивов за счет применения гребне- и рельсосмазывателей // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 7. С. 34–36. EDN HQMKIY

13. Свечников А. А. Снижение износа гребней колесных пар за счет применения системы лубрикации // Наука и образование транспорту. 2021. С. 97–100.

14. Лубрикация рельсов тяговым локомотивом в составе поезда / В. С. Коссов [и др.] // Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2017. Т. 76, № 1. С. 57–60. EDN YHPSWX

15. Блок управления АГС8.10М2. Руководство по эксплуатации АГС 8.10М2.00.00.РЭ. Ростов н/Д., 2009. 33 с.

16. Устройство управления автоматическим гребнесмазывателем. №2011108272/11: патент на полезную модель №107116 У1 Российская Федерация, МПК В61К 3/02. / Сачков А. А., Федоров Е. В.; заявитель открытое акционерное общество «Синара-Транспортные машины» (ОАО «СТМ»); заявл. 03.03.2011; опубл. 10.08.2011. EDN ZWDRLN

Дата поступления: 06.05.2026

Решение о публикации: 22.06.2026

Контактная информация:

МОСКОВСКИХ Кирилл Александрович — аспирант; kirillmoskovskikh@mail.ru

ИВАНОВ Павел Юрьевич — доктор техн. наук, доцент; savl.ivanov@mail.ru

КУДЬЯРОВ Иван Александрович — аспирант; mr.licrimovor@yandex.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич — доктор техн. наук, доцент; E. Dulskiy@mail.ru

Improvement of the Automatic Wheel Flange Lubrication System with Consideration of Locomotive Operating Conditions

K. A. Moskovskikh, P. Yu. Ivanov, I. A. Kud'yarov, E. Yu. Dul'skij

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

For citation: *Moskovskikh K. A., Ivanov P. Yu., Kud'yarov I. A., Dul'skij E. Yu.* Improvement of the Automatic Wheel Flange Lubrication System with Consideration of Locomotive Operating Conditions // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 625–634. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-625-634 (In Russian)

Abstract

Objective: to examine the problem of increased wear of wheelset flanges in pushing (helper) electric locomotives. To perform an analysis of the shortcomings of the automatic flange lubricator AGS8.10M2. To determine climatic factors affecting the lubricant delivery process of the flange lubricator. To describe

the operating principle and design of an adaptive automatic flange lubrication system. To perform mathematical modeling of the lubricant application process on the Bolshoy Lug — Slyudyanka 2 section at a speed of 60 km/h. **Methods:** comparison of the properties of the lubricating material used in the AGS8.10M2 depending on temperature. Mathematical modeling on the Bolshoy Lug — Slyudyanka 2 section at a speed of 60 km/h was carried out under different lubricant supply algorithms and different lubricant mass flow rates. **Results:** it was found that the leading type of wheelset defect is flange wear in electric locomotives operating in pushing mode. Analysis of the physical properties of the lubricating material used in the AGS8.10M2 showed a significant change in lubricant viscosity with temperature variation. A device with an adaptive lubricant supply control principle is proposed, ensuring lubricant delivery to the wheel flange taking into account locomotive operating conditions, including movement on curves and straight track sections, as well as stable lubrication in winter conditions due to maintaining an optimal temperature for the lubricant. Modeling results showed a reduction in the length of the “dry rail” section and a decrease in lubricant consumption with the adaptive control principle compared to the conventional principle implemented in the AGS8.10M2. **Practical significance:** the obtained modeling results confirm the feasibility of using adaptive flange lubrication systems to improve the efficiency of wheelset lubrication and reduce wheel flange wear.

Keywords: automatic flange lubricator, viscosity, modeling, lubrication supply control principle, specific mass of the lubricant, “dry rail”

References

1. Buinosov A.P. Analiz protsessov ekspluatatsionnogo iznosa grebnej bandazhej kolesnyh par elektrovozov [Analysis of Operational Wear of Wheel Flanges of Electric Locomotives], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]*, 2012, no. 3, pp. 79–84. EDN PASBDR (In Russian)
2. Vorob'ev A.A. Vliyanie mekhanicheskikh i metricheskikh svoystv na iznos i remontoprigochnost' kolesnyh par podvizhnogo sostava [Influence of Mechanical and Metric Properties on Wear and Maintainability of Wheelsets of Rolling Stock], *Vestnik IrGTU [Bulletin of Irkutsk State Technical University]*, 2010, no. 4 (44). (In Russian)
3. Vorob'ev A. A., Kotova V.V. Iznos v sisteme “koleso — rel's” [Wear in the Wheel — Rail System], *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Rostov State Transport University]*, 2014, no. 3, pp. 24–31. (In Russian)
4. Shalygin M. G., Vashchishina A. P. Obzor prichin intensivnogo iznosa grebnya kolesnoj pary i sposobov ego umen'sheniya [Review of Causes of Intensive Wear of Wheel Flange and Methods of Its Reduction], *Mekhaniki XXI veka [Mechanics of the 21st Century]*, 2020, no. 19, pp. 202–207. (In Russian)
5. Buinosov A.P. Metody povysheniya resursa kolesnyh par tyagovogo podvizhnogo sostava [Methods for Increasing the Service Life of Wheelsets of Traction Rolling Stock], *Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport]*, Moscow, 2010, 224 p. (In Russian)
6. Glazunov D.V. Sposoby snizheniya iznosa kolesnyh par podvizhnogo sostava [Ways to Reduce Wear of Wheelsets of Rolling Stock], *Izvestiya UGGU [News of the Ural State Mining University]*, 2019, no. 2 (54), pp. 107–114. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-2-107-114 (In Russian)
7. O Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federatsii do 2030 goda [On the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030], Order of the Government of the Russian Federation, dated June 17, 2008, no. 877-r. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9349/page/105104?id=155> (accessed: April 09, 2026). (In Russian)
8. Shmelev S.A., Bogdanov A.V. Sovremennoe sostoyanie voprosa povrezhdaemosti grebnej kolesnyh par i metody snizheniya ih iznosa i kontaktnoj ustalosti [Current State of the Issue of Damage to Wheel Flanges and Methods for Reducing Their Wear and Contact

Fatigue], *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2018, no. 9 (87), pp. 14–20. EDN YMBJTF (In Russian)

9. Petrov S. Yu., Kostyukevich A. I., Ryabov A. A. Uprochnenie grebnej i snizhenie iznosa kolesnyh par [Hardening of Flanges and Reduction of Wear of Wheelsets], *Mir transporta* [World of Transport], 2013, vol. 11, no. 2 (46), pp. 62–69. (In Russian)

10. Buinosov A. P., Pyshnyj I. M. Uvelichenie resursa bandazhej kolesnyh par promyshlennyh elektrovozov s pomoshch'yu naplavki [Increasing the Service Life of Wheel Treads of Industrial Electric Locomotives by Surfacing], *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of Transsib], 2012, no. 2 (10). (In Russian)

11. Buinosov A. P., Shepeleva I. O. Uvelichenie resursa kolesnyh par elektrovozov za schet plazmennogo uprochneniya grebnej bandazhej [Increasing the Service Life of Electric Locomotive Wheelsets by Plasma Hardening of Wheel Flanges], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region], 2013, no. 6, pp. 182–185. (In Russian)

12. Marulin S. L., Fetisova N. G., Buinosov A. P. Povyshenie resursa bandazhej kolesnyh par lokomotivov za schet primeneniya grebne- i rel'sosmazyvatelej [Increasing the Service Life of Locomotive Wheel Treads by Using Flange and Rail Lubricators], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region], 2021, no. 7, pp. 34–36. EDN HQMKIY (In Russian)

13. Svechnikov A. A. Snizhenie iznosa grebnej kolesnyh par za schet primeneniya sistemy lubrikatsii [Reduction of Wheel Flange Wear by Using a Lubrica-

tion System], *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and Education for Transport], 2021, pp. 97–100. (In Russian)

14. Kossov V. S., et al. Lubrikatsiya rel'sov tyagovym lokomotivom v sostave poezda [Lubrication of Rails by a Traction Locomotive as Part of a Train], *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Railway Research Institute], 2017, vol. 76, no. 1, pp. 57–60. EDN YHPSWX (In Russian)

15. Blok upravleniya AGS8.10M2. Rukovodstvo po ekspluatatsii AGS 8.10M2.00.00.RE [Control Unit AGS8.10M2. Operation Manual], Rostov-on-Don, 2009, 33 p. (In Russian)

16. Sachkov A. A., Fedorov E. V. Ustrojstvo upravleniya avtomaticheskim grebnesmazyvatelem [Control Device for Automatic Flange Lubricator], patent no. 107116 U1, Russian Federation, IPC B61K 3/02, appl. March 3, 2011, publ. August 10, 2011, applicant JSC Sinaro-Transportnye Mashiny. (In Russian)

Received: May 06, 2026

Accepted: June 22, 2026

Author's information:

Kirill A. MOSKOVSKIY — Postgraduate Student; kirillmoskovskikh@mail.ru

Pavel Yu. IVANOV — Dr. Sci. in Engineering; Associate Professor, savl.ivanov@mail.ru

Ivan A. KUD'YAROV — Postgraduate Student; mr.licrimovor@yandex.ru

Evgeniy Yu. DUL'SKIY — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; E. Dulskiy@mail.ru

УДК 629.4.027:539.37

Термомеханический анализ напряженно-деформированного состояния многослойных прессовых соединений моторно-осевых подшипников локомотивов

С. В. Кротов

Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Кротов С. В. Термомеханический анализ напряженно-деформированного состояния многослойных прессовых соединений моторно-осевых подшипников локомотивов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 635–648. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-635-648

Аннотация

Цель: установление фундаментальных термомеханических закономерностей эволюции нелинейного напряженно-деформированного состояния многослойных прессовых соединений моторно-осевых подшипников локомотивов в условиях синергетического воздействия начальных монтажных натягов и экстремальных температурных полей для прогнозирования границ их эксплуатационной надежности. **Методы:** в среде конечно-элементного анализа реализована двумерная осесимметричная нелинейная контактная модель сопряжения деталей. Взаимодействие контактных пар на границах стыков исследовано с применением нелинейных формулировок с учетом сил трения скольжения. Моделирование выполнено в рамках многоэтапного термомеханического нагружения, включающего последовательные стадии механической запрессовки элементов при базовой температуре, последующего равномерного теплового воздействия в условиях рабочего режима и возврата к исходному температурному состоянию, а также независимого анализа работы конструкции в условиях экстремального нагрева и глубокого охлаждения. **Результаты:** установлено, что при рабочем нагреве до 90 °С контактное давление снижается на 4,3 % (до 39,9 МПа), активизируя осевое проскальзывание вкладыша до 22,14 мкм. При экстремальном нагреве (+200 °С) эквивалентные напряжения в стальной рубашке достигают пика 245,6 МПа, сохраняя упругий характер деформирования (70 % от предела текучести). При экстремальном охлаждении (–40 °С) интенсивное термическое сжатие бронзы приводит к росту напряжений во вкладыше до 99 МПа, что создает локальную опасность пластического смятия антифрикционного слоя. **Практическая значимость:** полученные количественные закономерности позволяют обосновать оптимальные монтажные натяги и температурные интервалы безопасной эксплуатации подшипниковых узлов локомотивов, исключая раскрытие стыков и пластическую деградацию элементов, а также могут использоваться при проектировании перспективных узлов локомотивов.

Ключевые слова: моторно-осевой подшипник, прессовое соединение, натяг, контактное давление, эквивалентные напряжения по Мизесу, тепловое расширение, ANSYS

Введение

Согласно утвержденной Правительством РФ Транспортной стратегии до 2030 года (с прогнозом до 2035 года) [1], главными направлениями развития железнодорожной от-

расли являются непрерывный рост осевых нагрузок, повышение мощностей тягового подвижного состава и комплексная интенсификация режимов его эксплуатации. В этих условиях обеспечение эксплуатационной

надежности узлов трения колесно-моторных блоков (КМБ) локомотивов выступает ключевой научно-технической задачей для снижения издержек на неплановые ремонты и гарантирования безопасности движения тяжеловесных поездов.

Одним из наиболее нагруженных элементов КМБ тепловозов массовых серий является моторно-осевой подшипник (МОП) скольжения. Традиционная конструкция данного узла представляет собой сложную многослойную систему, состоящую из сплошной стальной оси колесной пары, на которую последовательно с гарантированным прессовым натягом монтируются стальная вкладыш-основа, антифрикционный слой из оловянистой бронзы (БрОЦС5–5–5) и жесткий стальной остов тягового электродвигателя. В процессе передачи силы тяги данное сопряжение подвергается экстремальным радиальным и динамическим воздействиям. Несмотря на высокую точность технологических процессов сборки, до 15–18 % зафиксированных отказов КМБ в эксплуатации связаны с конструктивными нарушениями работоспособности МОП, выражающимися в усталостном отслоении бронзового слоя, релаксации контактных давлений и, как следствие, аварийном провороте вкладышей в корпусе остова [2, 3].

Классические методы расчета таких узлов базируются на аналитических решениях теории упругости для изотропных цилиндров (задача Ламе), предложенных в трудах С. П. Тимошенко [4] и развитых применительно к машиностроению в работах Е. С. Гречищева [5]. Однако данные методы рассматривают прессовые посадки исключительно при нормальной температуре сборки $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и не учитывают дилатансионные эффекты, возникающие при реальной эксплуатации.

Расчетные методы оценки несущей способности, зон частичного раскрытия и топографии фреттинг-повреждаемости прессовых посадок ж/д подвижного состава рассмотрены в [7–9]. На базе методов факторного и дискриминантного анализа детально описана топография износа сопряжений колесных пар. Вопросами повышения эксплуатационной надежности ж/д прессовых узлов, подшипниковых опор и КМБ также активно занимаются научные школы Санкт-Петербурга [10, 11] и Екатеринбург [12].

Однако термомеханическое поведение многослойных прессовых посадок в условиях температурных градиентов требует дальнейшего детального изучения. В процессе работы подшипника за счет трения в зоне контакта происходит интенсивное тепловыделение, приводящее к локальному нагреву узла до температур дилатансионные эффекты [12, 13], возникающие при реальной эксплуатации 85–110 °C. Поскольку коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) оловянистой бронзы $\alpha = 18 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ значительно превышает КЛТР конструкционных сталей вала и корпуса $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, зажатый между стальными слоями бронзовый элемент оказывается в условиях стесненного температурного расширения (эффект термического зажатия). Зарубежные исследователи в последние годы активно развивают методы оценки подобных температурных деформаций в составных цилиндрических парах методами конечных элементов [14–16].

Целью настоящего исследования является количественная оценка термомеханического состояния многослойного прессового соединения МОП тепловоза в эксплуатационных режимах методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе Ansys Mechanical.

Материалы и методы моделирования

В данном исследовании была принята осесимметричная расчетная 2D-модель, состоящая из четырех концентрических слоев шириной $B = 90$ мм со следующими радиальными границами:

- вал (сталь Ос.В): сплошной, радиус — от 0 до 50 мм;
- внутренняя стальная втулка (сталь 40Х): радиус — от 50 до 60 мм;
- антифрикционный вкладыш (бронза БрОЦС5-5-5): радиус — от 60 до 70 мм;
- наружная рубашка остова (сталь 45): радиус — от 70 до 90 мм.

В модель заложены радиальные монтажные натяги (половина диаметральных): стык 1 (вал-втулка) — 0,04 мм; стык 2 (втулка-бронза) — 0,02 мм; стык 3 (бронза-рубашка) — 0,03 мм. Контактные пары настроены как нелинейные с трением (*Frictional*) с коэффициентом трения $f = 0,15$ и формулировкой *Augmented Lagrange*. Осевая фиксация (по оси Y) выполнялась по боковому торцу деталей $Y = 0$, $Displacement = 0$. Физико-механические свойства материалов заложены в соответствии со справочными данными отраслевых стандартов и руководств [18, 19].

Конечно-элементная сетка модели соединения четырех элементов подшипника аппроксимирована прямоугольными элементами величиной 2 мм, что для данных условий расчета приемлемо.

Расчет реализован в три этапа: на первом шаге ($Time = 1$ с) моделируется запрессовка при базовой температуре 22°C , на втором шаге ($Time = 2$ с) ко всем телам прикладывается равномерная тепловая нагрузка $T = 90^\circ\text{C}$. Далее, на третьем шаге, исследовано НДС модели при остывании до 22°C . Независимо рассмотрены экстремальные режимы: нагрев прессового соединения до 200°C и охлаждение до -40°C .

Результаты и обсуждение

Напряженно-деформированное состояние узла после сборки ($T = 22^\circ\text{C}$)

На первом этапе численного эксперимента исследовалось исходное механическое состояние многослойного соединения при нормальной температуре сборки $T = 22^\circ\text{C}$, когда формируется исходное поле давлений. Максимальное контактное давление фиксируется на стыке 1 ($R = 50$ мм) и составляет 81,2 МПа, что

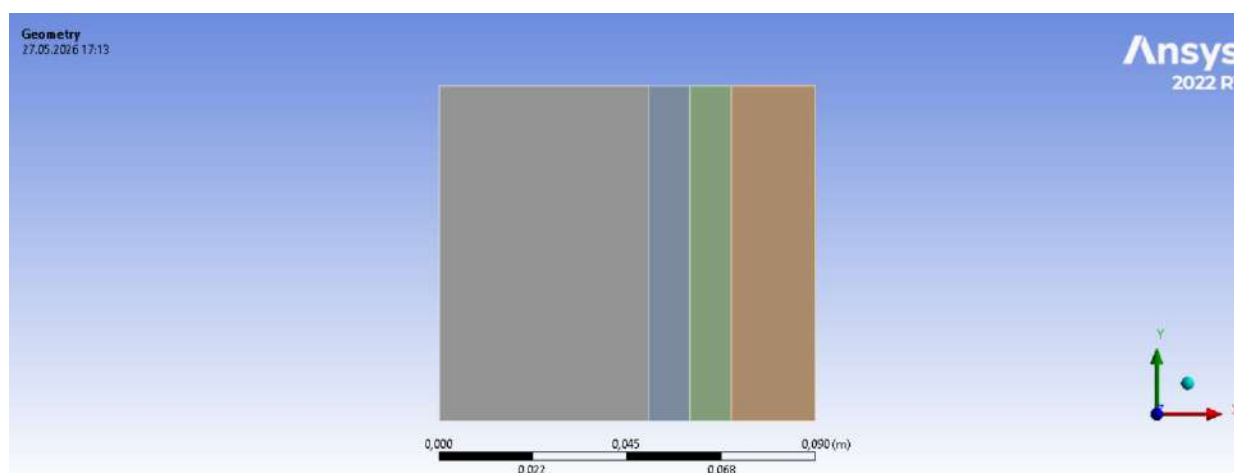


Рис. 1. Модель прессового соединения моторно-осевого подшипника локомотива

обусловлено наибольшим натягом и жесткостью сплошного вала. На стыке 2 давление достигает 54,8–59,2 МПа, а на наименее жестком наружном стыке 3 падает до 41,7 МПа. Эквивалентные напряжения по Мизесу локализуются на внутреннем радиусе стальной рубашки ($R = 70$ мм), достигая пика 195,8 МПа (55 % от предела текучести стали 45).

Влияние фреттинг-фактора и кинетики микропроскальзывания

Важным диагностическим критерием надежности прессовой посадки является параметр взаимного микропроскальзывания деталей (*Sliding Distance*). На первом шаге расчета зафиксировано, что максимальная величина микросдвигов составляет 9,48 мкм. Характер распределения данного параметра носит ярко выраженный краевой характер: микропроскальзывания локализованы строго на крайних торцевых участках сопряжений, тогда как в центральной части втулок они близки к нулю из-за высокого обжатия. Выявленные зоны пиковой микроподвижности полностью совпадают с реальными очагами развития фреттинг-коррозии, наблюдаемыми при дефектоскопии подшипников в условиях депо.

Верификация конечно-элементной модели

Для подтверждения достоверности разработанной КЭ-модели проведено сопоставление полученных численных значений контактных давлений на границах раздела сред с аналитическим решением многослойной задачи Ламе [6].

Математическое обоснование расчетов с целью верификации результатов

Взаимосвязь между натягом и контактным давлением в цилиндрическом соедине-

нии на основе задач Ламе выражается через коэффициент податливости соединения K (или матрицу податливости, если деталей несколько) соотношением $K \cdot P = d$, где d — расчетный натяг, а P — контактное давление [5, 6].

Диаметральная податливость контакта i от давления на радиусе R определяется выражением [5, 6]:

$$K = \frac{2R}{E}(\pm\mu).$$

Выполним демонстрационный расчет для первой детали (размерности линейные — м, давления и модули упругости — МПа).

Подставив геометрические параметры и константы упругости в формулы толстостенных цилиндров, получаем точные значения коэффициентов для матрицы податливости Ламе.

Рассчитаем коэффициенты для стыка 1 ($R_1 = 50$ мм).

На этом стыке взаимодействуют: сплошной стальной вал, который сжимается давлением P_1 , и первая стальная втулка, которая растягивается давлением P_1 изнутри и сжимается давлением P_2 снаружи.

Определим податливость сплошного вала K_{11} :

$$K_{11} = \frac{2R}{E_{\text{ст}}}(1-\mu) = \frac{2 \cdot 0,05}{2 \cdot 10^5}(1-0,3) = 0,35 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}}{\text{МПа}}.$$

Втулка 1 находится в границах от $R_1 = 50$ мм до $R_2 = 60$ мм. Тогда податливость втулки 1 от внутреннего давления K_{12} :

$$K_{13} = \frac{2R_1}{E_{\text{ст}}} \left(\frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \mu_{\text{ст}} \right) = \frac{2 \cdot 0,05}{2 \cdot 10^5} \left(\frac{2 \cdot 0,06^2}{0,06^2 - 0,05^2} + 0,3 \right) = 3,2727 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}}{\text{МПа}}.$$

Взаимная податливость K_{13} стыка 1 от давления P_2 на стыке 2, то есть давление P_2 на

наружном радиусе втулки 1 R_2 , деформирует вторую втулку вовнутрь к радиусу R_1 :

$$K_{13} = \frac{2R_1}{E_{ст}} \left(\frac{2R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \mu_{ст} \right) = \frac{2 \cdot 0,05}{2 \cdot 10^5} \left(\frac{2 \cdot 0,06^2}{0,06^2 - 0,05^2} + 0,3 \right) = 3,2727 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}}{\text{МПа}}.$$

Остальные коэффициенты подсчитываются аналогично.

Система уравнений совместности деформаций Ламе при помощи коэффициентов податливости K_{ij} для трехконтактной системы связывает радиальные натяги с контактными давлениями P_1, P_2, P_3 следующим образом:

$$\begin{cases} (K_{11} + K_{12}) \cdot P_1 + K_{13} P_2 = \delta_1 \\ -K_{21} \cdot P_1 + (K_{22} + K_{23}) P_2 - K_{24} P_3 = \delta_2 \\ -K_{32} \cdot P_2 + (K_{33} + K_{34}) \cdot P_3 = \delta_3 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 1,636 \cdot 10^{-12} & -1,636 \cdot 10^{-12} & 0 \\ -1,364 \cdot 10^{-12} & 5,168 \cdot 10^{-12} & -3,933 \cdot 10^{-12} \\ 0 & -3,371 \cdot 10^{-12} & 5,636 \cdot 10^{-12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \cdot 10^{-5} \\ 2 \cdot 10^{-5} \\ 3 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Решая полученную систему уравнений, находим теоретические контактные давления, представленные в табл. 1.

Минимальное расхождение между теоретическими и численными результатами (не превышающее 3% в середине втулки) строго доказывает адекватность построенной модели. При этом МКЭ-расчет позволил выявить краевые эффекты (концентрацию напряжений на торцах), которые принципиально не учитываются аналитическими формулами [13, 16].

Эпюры контактных давлений, скольжения, эквивалентных напряжений и деформаций при $T = 22^\circ\text{C}$ показаны на рис. 2–5.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ контактных давлений при монтаже $T = 22^\circ\text{C}$

Граница сопряжения слоев	Радиус стыка, мм	Аналитическое решение (Ламе), МПа	Численное моделирование (МКЭ), МПа	Относительная погрешность, %
Стык 1: вал — стальная втулка	50	82,65	81,3	1,7
Стык 2: стальная втулка — бронза	60	58,2	59,8	2,7
Стык 3: бронза — рубашка остова	70	42,73	41,9	1,9

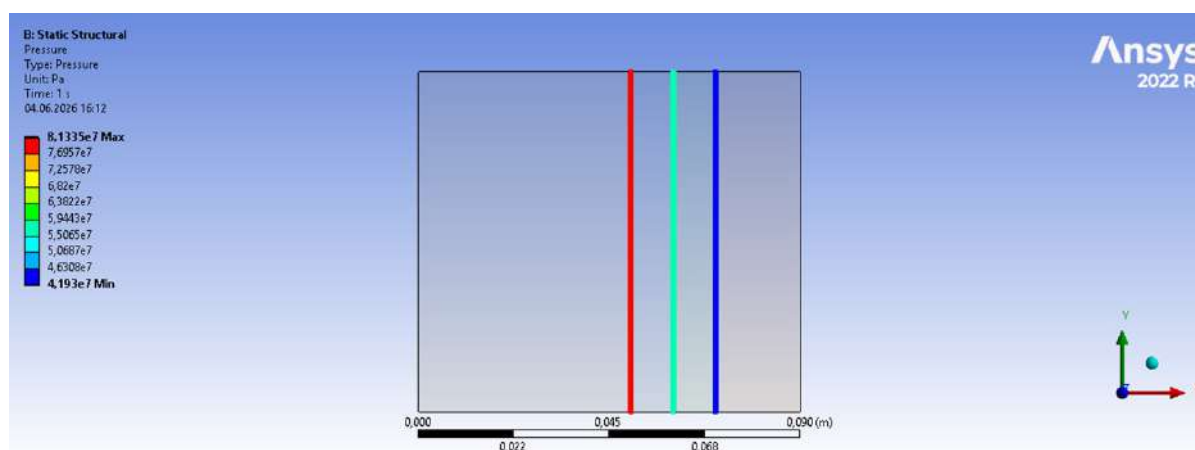


Рис. 2. Эпюры контактного давления на трех границах раздела сред при нормальной температуре сборки $T = 22^\circ\text{C}$

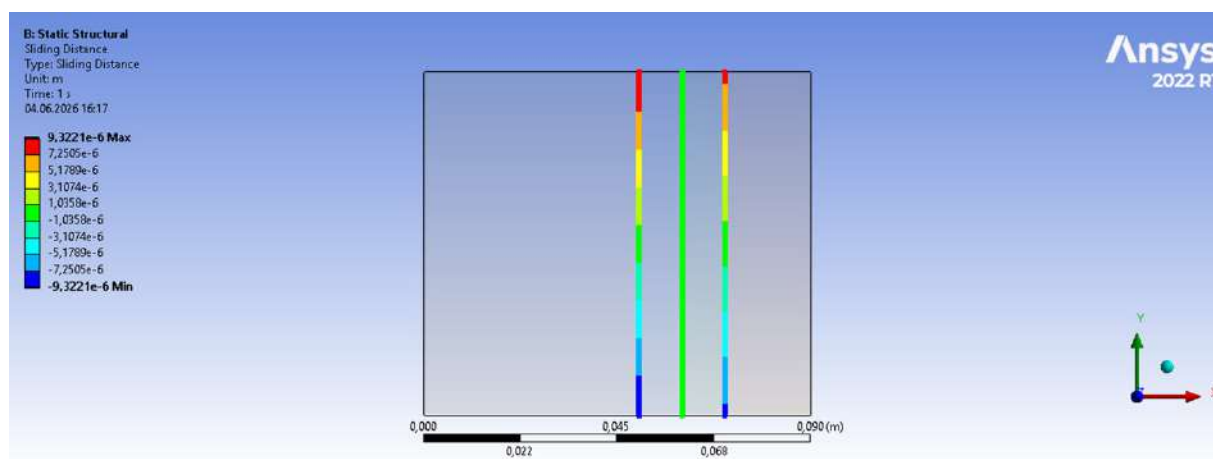


Рис. 3. Распределение величины взаимного микропроскальзывания деталей вдоль контактных линий на шаге сборки $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

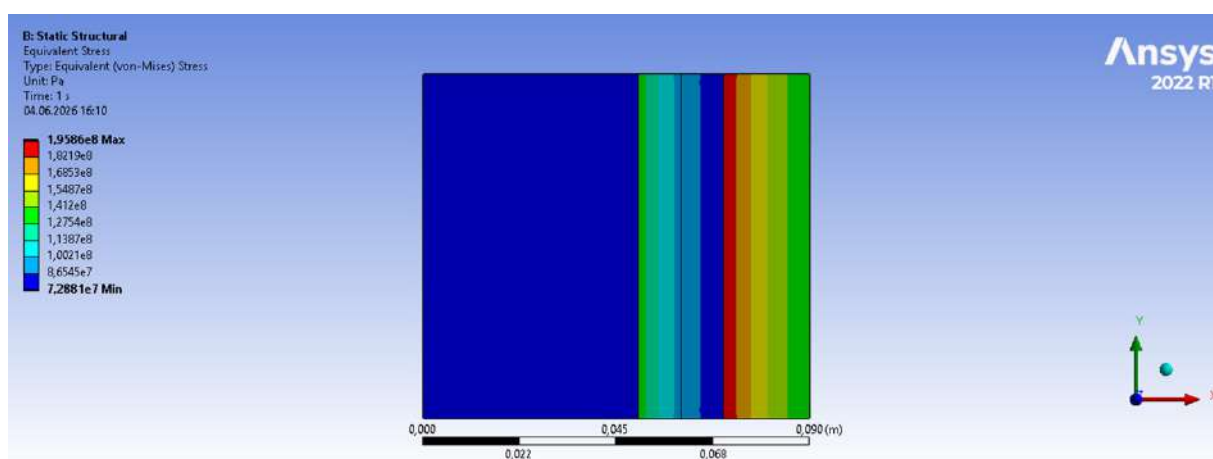


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу в элементах многослойного прессового соединения при эксплуатационной температуре $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

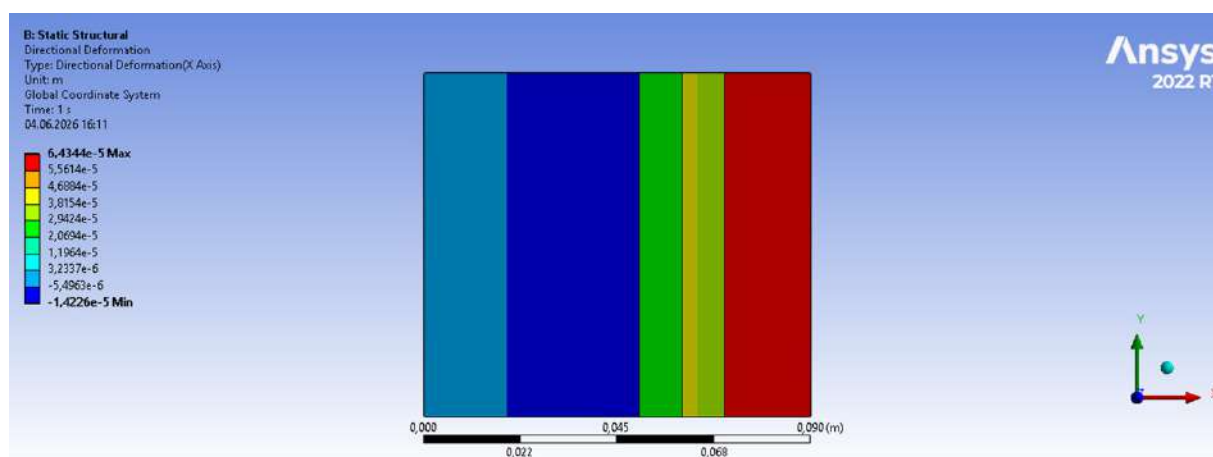


Рис. 5. Поле радиальных перемещений элементов конструкции в условиях теплового воздействия $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Термомеханический анализ при эксплуатационном нагреве ($T = 90^\circ\text{C}$)

На втором шаге моделирования в систему было введено температурное $T = 90^\circ\text{C}$, соответствующее предельному нагреву МОП при длительной работе локомотива. Из-за значительного различия КЛТР оловянистой бронзы и конструкционных сталей в структуре развился нелинейный эффект стесненного термического зажатия. Замкнутый между стальным валом и наружным жестким стальным корпусом бронзовый слой начал интенсивно расширяться.

Эпюры контактных давлений, скольжения, эквивалентных напряжений и деформаций при $T = 90^\circ\text{C}$ показаны на рис. 6–9.

При рабочем нагреве до 90°C ($\text{Time} = 2\text{ с}$) за счет опережающего теплового расширения бронзового вкладыша $\alpha_{\text{бронза}} > \alpha_{\text{сталь}}$ происходит общая радиальная разгрузка стыков. Напряжения на стыке 1 меняются слабо (80,1 МПа) из-за однородности материалов вала и втулки. Контактное давление на стыке 3 снижается до 39,9 МПа. Ослабление удерживающей силы трения приводит к росту осевого проскальзывания на границе бронзы и рубашки до 22,14

мкм. Пик напряжений в рубашке возрастает до 215,8 МПа.

Однако следует отметить, что, если задача решается в упругой постановке, значения напряжений будут значительно выше. Были проведены тестовые расчеты, при этом эквивалентные напряжения достигли 3082 МПа. Очевидно, это приводит к неверным выводам. В данном случае следует остерегаться такой постановки задачи — необходимо учитывать пластические составляющие материалов, входящих в модель соединения.

При подаче тепловой нагрузки характер деформации узла изменился (рис. 9). Радиальные перемещения наружного диаметра корпуса остаются фактически без изменений $\approx 64\text{ мкм}$. Расширяющаяся бронза интенсивно выталкивает стальную рубашку остова наружу. Величина взаимных микропроскальзываний (*Sliding Distance*) на свободных торцах втулок увеличилась вдвое — с 9,48 до 14,2 мкм.

Верификация расчетов при $T = 90^\circ\text{C}$

Вследствие стесненного температурного расширения бронзы вектор натягов d пересчитывается:

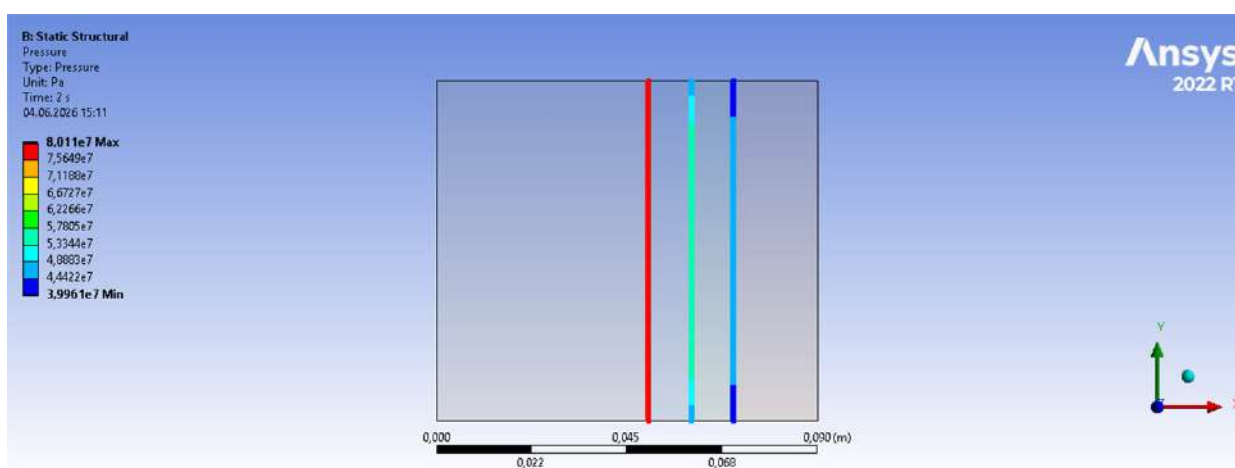


Рис. 6. Эпюры контактного давления на трех границах раздела сред при температуре нагрузки $T = 90^\circ\text{C}$

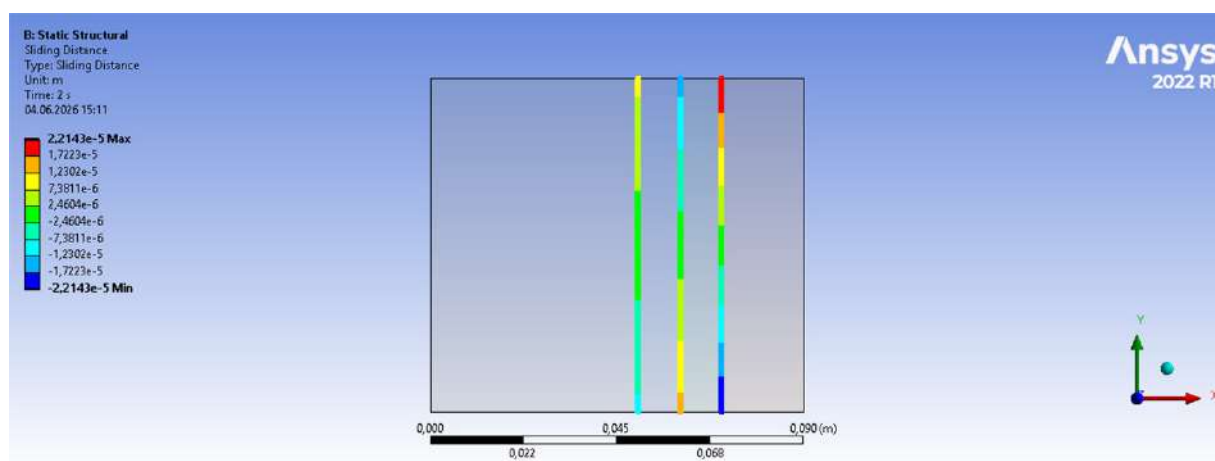


Рис. 7. Распределение величины взаимного микропроскальзывания деталей вдоль контактных линий на шаге нагрузки $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

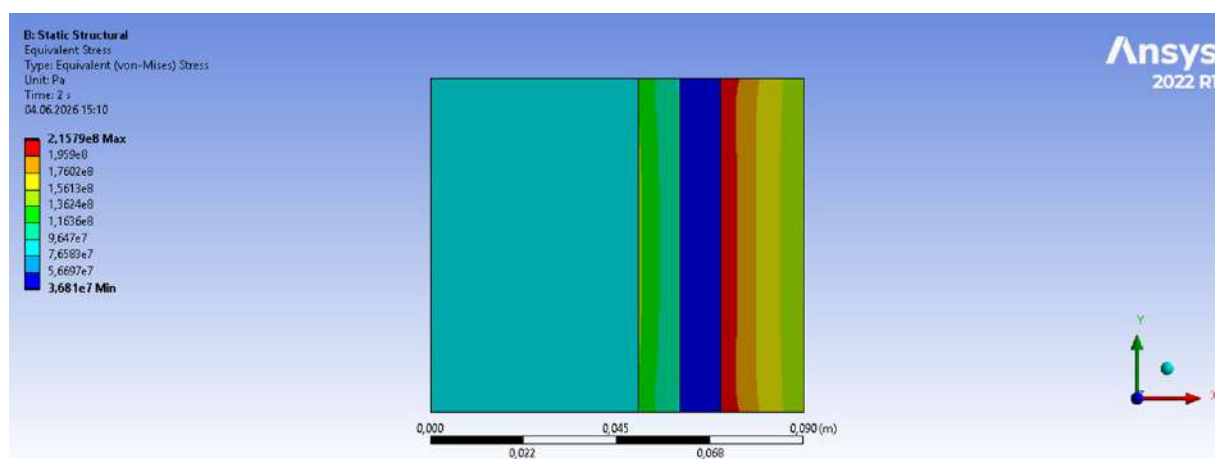


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу в элементах многослойного прессового соединения при эксплуатационном нагреве до $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

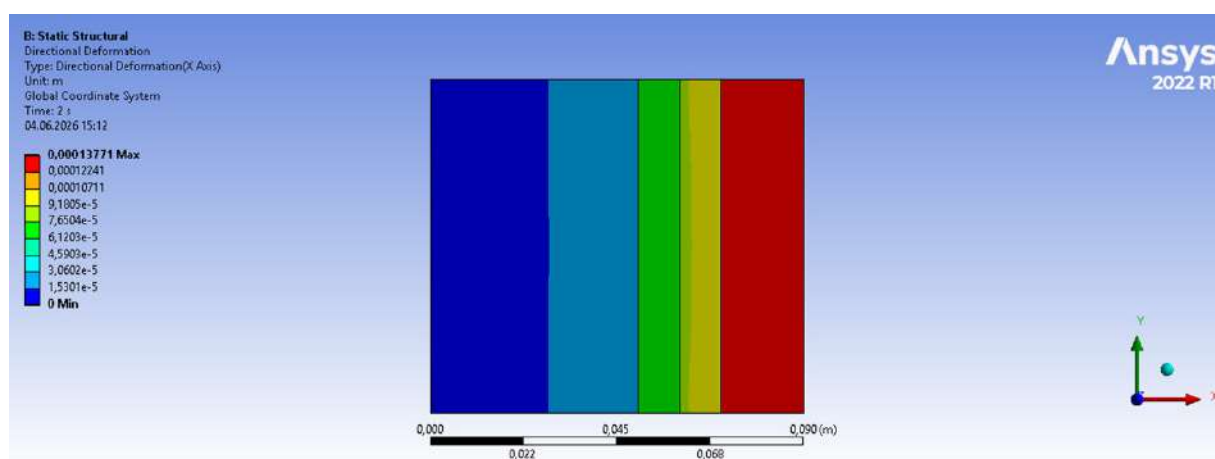


Рис. 9. Поле радиальных перемещений элементов конструкции в условиях теплового воздействия $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\begin{pmatrix} 1,636 \cdot 10^{-12} & -1,636 \cdot 10^{-12} & 0 \\ -1,364 \cdot 10^{-12} & 5,168 \cdot 10^{-12} & -3,933 \cdot 10^{-12} \\ 0 & -3,371 \cdot 10^{-12} & 5,636 \cdot 10^{-12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \cdot 10^{-5} \\ 4,448 \cdot 10^{-5} \\ 0,144 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Здесь изменение натягов при нагреве $T = 90^\circ\text{C}$:

$$\delta_2 = \delta_i + (\alpha_{\text{наруж}} - \alpha_{\text{внутр}}) \cdot R_i \cdot \Delta T \text{ (м)},$$

где δ — натяг в соответствующем стыке;

α — коэффициент температурного расширения наружной и внутренней детали;

R — радиус соответствующей детали;

Δ — величина увеличения температуры.

Далее получаем:

$$\delta_1 = 4 \cdot 10^{-5} + (12 - 12) \cdot 10^{-6} \cdot 0,05 \cdot 68 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

$$\delta_2 = 2 \cdot 10^{-5} + (18 - 12) \cdot 10^{-6} \cdot 0,06 \cdot 68 = 4,45 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

$$\delta_3 = 3 \cdot 10^{-5} + (12 - 18) \cdot 10^{-6} \cdot 0,07 \cdot 68 = 0,144 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Новые аналитические и рассчитанные в Ansys значения давлений показаны в табл. 2.

На этапе полного остывания ($Time = 3 \text{ с}$, $T = 22^\circ\text{C}$) геометрия и НДС системы практически полностью возвращаются к начальным значениям (разница пиков деформаций и напряжений составляет менее 0,3 %, ($\sigma_{\text{max}} = 196,4 \text{ МПа}$). Это доказывает, что в штатном рабочем цикле конструкция функционирует строго в упругой области. Наличие нелинейного трения вызывает лишь микроскопические остаточные сдвиги на контактных границах.

Анализ критических состояний в экстремальных режимах

С целью определения границ эксплуатационной надежности исследованы критические режимы работы прессового соединения.

Режим экстремального нагрева $T = 200^\circ\text{C}$: характеризуется интенсивным стесненным расширением внутренних слоев. Максимальное эквивалентное напряжение смещается на внутренний радиус наружной стальной рубашки остова и достигает 245,6 МПа. Данное значение составляет около 70 % от предела текучести стали $45 \sigma_y = 350 \text{ МПа}$. Таким образом, с позиции прочности стали даже аварийный перегрев до 200°C не приводит к пластическому разрушению несущих элементов остова.

Режим экстремального охлаждения $T = -40^\circ\text{C}$ представляет наибольшую опасность для антифрикционных элементов. При снижении температуры бронзовый вкладыш сжимается в радиальном направлении быстрее стальной рубашки и внутренней втулки. Происходит существенное падение радиального давления сборки, однако эквивалентные напряжения внутри самого бронзового слоя возрастают до 99 МПа. С учетом того, что предел текучести σ_y литой бронзы БрОЦС5-5-5 находится в диапазоне 90–120 МПа, режим зимнего пуска при температурах ниже -40°C является критическим: возникает высокий риск локального пластического смятия вкладыша и последующей необратимой потери натяга в соединении.

ТАБЛИЦА 2. Сравнительный анализ контактных давлений при монтаже $T = 90^\circ\text{C}$

Граница сопряжения слоев	Радиус стыка, мм	Аналитическое решение (Ламе), МПа	Численное моделирование (МКЭ), МПа	Относительная погрешность, %
Стык 1: вал — стальная втулка	50	83,16	80,1	3,7
Стык 2: стальная втулка — бронза	60	60,71	59,5	2
Стык 3: бронза — рубашка остова	70	38,94	39,96	2,6

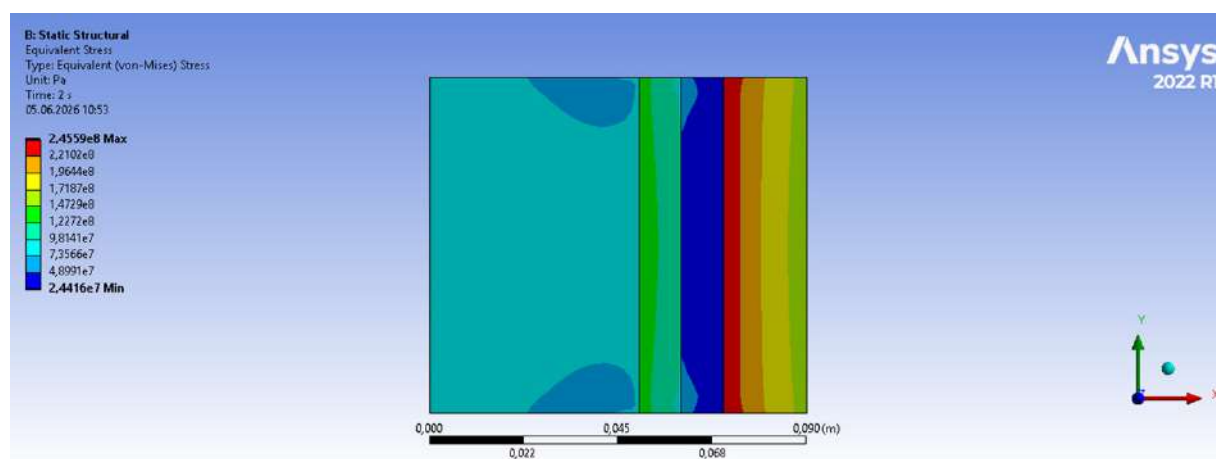


Рис. 10. Поле радиальных перемещений элементов конструкции в условиях аварийного воздействия $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

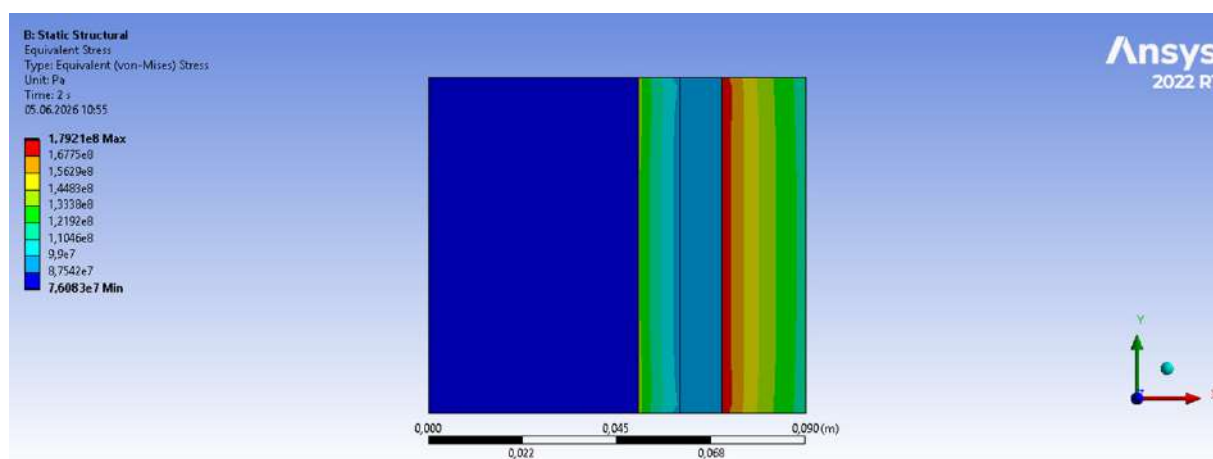


Рис. 11. Поле радиальных перемещений элементов конструкции в условиях воздействия $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Заключение

На основе проведенного термоструктурного численного моделирования многослойного прессового соединения моторно-осевого подшипника локомотива в программном комплексе Ansys Mechanical сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработанная нелинейная осесимметричная конечно-элементная модель позволяет адекватно оценивать изменение напряженно-деформированного состояния многослойной прессовой посадки МОП локомотива на всех

стадиях термомеханического цикла. При нормальной температуре ($T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) контактное давление в центре втулок разошлось с классическим решением многослойной задачи Ламе менее чем на 3 %. Такое совпадение подтверждает точность разработанного численного алгоритма.

2. Стандартный цикл «нагрев до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ — остывание» укладывается в упругую зону. Детали не получают необратимых пластических деформаций, что указывает на стабильность рассматриваемой модели. Эквивалентные

напряжения (216 МПа) и контактные давления остаются ниже пределов текучести металлов. Соответственно, при нагреве сопряженные материалы гарантированно не переходят в область нелинейных деформаций, и это несмотря на сильное радиальное зажатие бронзовых элементов по посадочным поверхностям. Когда узел остывает до исходной температуры, объем деформированной бронзы релаксирует, но сохраняет монтажный натяг. Риск аварийного проворота вкладыша исключен.

3. Если поднять рабочую температуру до 200 °С, эквивалентные напряжения в стальной рубашке остова вырастут до 245,6 МПа. Для стали 45 это дает полуторный запас прочности. Критическое состояние конструкции возникает на противоположном полюсе — при морозе ($T = -40$ °С). Из-за сильного термического сжатия бронзы напряжения во вкладыше подскакивают до 99 МПа. Возникает прямая угроза потери натяга, так как антифрикционный материал может просто смяться.

Точные объемы пластического течения и кинетику релаксации натягов с учетом физической нелинейности автор планирует рассчитывать в следующих работах.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р) // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru>
2. Воробьев А. А., Данилов И. В. Повышение надежности моторно-осевых подшипников тягового подвижного состава // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института тепловозов (ВНИТИ). 2012. № 14. С. 45–52.
3. Ильин В. В., Попов С. А. Анализ эксплуатационной повреждаемости КМБ современных магистральных тепловозов // Локомотив. 2021. № 8. С. 14–17.
4. Тимошенко С. П., Гере Д. Механика материалов / пер. с англ. М.: Мир, 1976. 669 с.
5. Гречищев Е. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом: расчет, проектирование, изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
6. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
7. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the Discriminant Analysis at Research of Bearing Ability of the Wheel Pair of the Car // Transport Problems. Katowice (Poland): Silesian University of Technology. 2011. Vol. 6, iss. 1. Pp. 43–49.
8. Кротов С. В., Сладковски А. Факторный анализ расчета несущей способности колесной пары вагона // Транспорт Урала. 2012. № 2 (33). С. 36–40. EDN OXWYVF
9. Кротов С. В., Кононов Д. П. Исследование напряженно-деформированного состояния при контакте цилиндрических поверхностей деталей железнодорожного подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 33–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47. EDN CTWKWK
10. Кудрявцев М. А. Численный анализ и трибомеханика цилиндрических соединений с натягом на ж/д транспорте. СПб.: ПГУПС, 2019. 162 с.
11. Иванов П. С. Оценка концентрации осевых напряжений в элементах подшипников скольжения тяговых двигателей // Труды Петербургского государственного университета путей сообщения. 2023. Т. 20, вып. 2. С. 88–95.
12. Сайтбурханов Ш. Р. Исследование напряженно-деформированного состояния сопряжений КМБ локомотивов в условиях уральских

железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2020. 145 с.

13. Ахмеджанов Р. А., Доронин С. В. Оценка термонапряженного состояния прессовых соединений разнородных материалов методом конечных элементов // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 4. С. 12–23. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.4

14. Богданов В. М. Развитие конструкций и методов расчета узлов трения колесно-моторных блоков локомотивов. М.: Транспорт, 2005. 188 с.

15. Croccolo D., Agostinis M. De, Fini S. Influence of the Fitting Temperature and Parameters on the Load Capacity of Interference Fits // Metric Mechanics and Design. 2020. Vol. 142. Pp. 105–114.

16. Zhang Y., Liu X. Finite Element Analysis of Multi-Layered Interference Fits Under Thermal-Mechanical Coupling // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. Vol. 36, no. 5. Pp. 2341–2349.

17. Pedersen P. T. On the Design and Optimization of Multi-Layered Shrink Fits with Thermal Constraints // International Journal of Solids and Structures. 2021. Vol. 210. Pp. 45–56.

18. Колесников И. В. Трибология и механика контактного взаимодействия узлов трения подвижного состава. Ростов н/Д.: Изд-во РГУПС, 2021. 210 с.

19. Ansys Mechanical User's Guide. Release 2022 R1. Canonsburg: Ansys, Inc., 2022. 1854 p. URL: ansys.com (accessed: 29.05.2026).

Дата поступления: 03.06.2026

Решение о публикации: 09.07.2026

Информация об авторах:

КРОТОВ Сергей Викторович — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика»; svk-19587@yandex.ru

Thermomechanical Analysis of the Stress-Strain State of Multilayer Press Joints of Motor-Axial Bearings of Locomotives

S. V. Krotov

Rostov State University of Railway Transport, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: Krotov S. V. Thermomechanical Analysis of the Stress-Strain State of Multilayer Press Joints of Motor-Axial Bearings of Locomotives // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 635–648. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-635-648 (In Russian)

Abstract

Objective: the study aims to establish the fundamental thermomechanical patterns of non-linear stress-strain state evolution in multi-layered interference fits of locomotive suspension bearings under the synergetic effect of initial assembly interferences and extreme temperature fields to predict their operational reliability thresholds. **Methods:** a two-dimensional axisymmetric non-linear contact model of the component assembly was implemented using finite element analysis software. The interaction of contact pairs at the interface boundaries was investigated using non-linear formulations that account for sliding friction forces. The simulation was performed within a multi-stage thermomechanical loading framework. This framework included sequential stages of mechanical press-fitting of components at baseline temperature, subsequent uniform thermal exposure under operating conditions, and a return to the initial thermal state, alongside an independent analysis of structural performance under extreme heating and deep cooling. **Results:** it was established that during operational heating up to 90 °C, the contact pressure decreases by 4.3 % (down to 39.9 MPa), which triggers an axial slippage of the bearing

shell up to 22.14 μm . Under extreme heating (+200 °C), the equivalent stresses in the steel jacket peak at 245.6 MPa, while maintaining an elastic deformation behavior (70 % of the yield strength). Under extreme cooling (−40 °C), the intensive thermal contraction of the bronze leads to an increase in bearing shell stresses up to 99 MPa, which creates a local risk of plastic collapse within the anti-friction layer.

Practical significance: the obtained quantitative patterns allow for the substantiation of optimal assembly interferences and temperature ranges for the safe operation of locomotive bearing units, preventing interface separation and plastic degradation of the elements. Furthermore, these results can be utilized in the design of prospective locomotive components.

Keywords: suspension bearing, interference fit, interference, contact pressure, von Mises equivalent stress, thermal expansion, Ansys

References

1. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast for the Period until 2035], approved by the Order of the Government of the Russian Federation, dated November 27, 2021, no. 3363-r. Official Internet Portal of Legal Information. URL: <http://pravo.gov.ru> (accessed: May 29, 2026). (In Russian)
2. Vorobiev A. A., Danilov I. V. Povyshenie nadezhnosti motoro-osevyh podshipnikov tyagovogo podvizhnogo sostava [Improving the Reliability of Motor-Axle Bearings in Traction Rolling Stock], *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i projektно-konstruktorskogo instituta teplovozo-ov (VNITI) [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of Locomotives (VNITI)]*, 2012, no. 14, pp. 45–52. (In Russian)
3. Ilyin V. V., Popov S. A. Analiz ekspluatatsionnoj povrezhdaemosti KMB sovremennyh magistralnyh teplovozo-ov [Analysis of Operational Damageability of Wheel-Motor Blocks in Modern Mainline Locomotives], *Lokomotiv [Locomotive]*, 2021, no. 8, pp. 14–17. (In Russian)
4. Timoshenko S. P., Gere J. Mekhanika materialov [Mechanics of Materials], translated from English. Moscow, Mir Publishers, 1976, 669 p. (In Russian)
5. Grechishchev E. S., Ilyashenko A. A. Soedineniya s natyagom: raschet, projektirovanie, izgotovlenie [Interference Fits: Calculation, Design, Manufacturing]. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 247 p. (In Russian)
6. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. Raschet na prochnost detalej mashin: spravochnik [Strength Calculation of Machine Parts: Handbook], 4th ed., revised and expanded. Moscow, Mashinostroenie Publishers, 1993, 640 p. (In Russian)
7. Krotov S. V., Krotov V. P. Application of the Discriminant Analysis at Research of Bearing Ability of the Wheel Pair of the Car, *Transport Problems*, Katowice (Poland), Silesian University of Technology, 2011, vol. 6, iss. 1, pp. 43–49.
8. Krotov S. V., Sladkovski A. Faktornyj analiz rascheta nesushchej sposobnosti kolesnoj pary vagona [Factor Analysis of Calculating the Load-Bearing Capacity of a Railcar Wheelset], *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2012, no. 2 (33), pp. 36–40. EDN OXWYVF (In Russian)
9. Krotov S. V., Kononov D. P. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri kontakte cilindricheskih poverhnostej detalej zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Study of the Stress-Strain State at the Contact of Cylindrical Surfaces of Railway Rolling Stock Components], *Byulleten' rezultatov nauchnyh issledovanij [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2022, no. 1, pp. 33–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47. EDN CTWKWK. (In Russian)
10. Kudryavtsev M. A. Chislennyj analiz i tribomekhanika cilindricheskih soedinenij s natyagom na zh/d transporte [Numerical Analysis and Tribomechanics of Cylindrical Interference Fits in Railway Transport]. St. Petersburg: Petersburg State Transport University, 2019, 162 p. (In Russian)

11. Ivanov P. S. Otsenka koncentracii osevyh napryazhenij v elementah podshipnikov skolzheniya tyagovyh dvigatelej [Assessment of Axial Stress Concentration in Sliding Bearing Elements of Traction Motors], *Trudy Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg State Transport University]*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 88–95. (In Russian)
12. Sajtburkhanov Sh. R. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sopryazhenij KMB lokomotivov v usloviyah ural'skih zheleznih dorog [Study of the Stress-Strain State of Wheel-Motor Block Joints in Locomotives under Conditions of the Ural Railways], Yekaterinburg, Ural State Transport University, 2020, 145 p. (In Russian)
13. Akhmedzhanov R. A., Doronin S. V. Otsenka termonapryazhennogo sostoyaniya pressovyh soedinenij raznorodnyh materialov metodom konechnykh elementov [Assessment of the Thermal Stress State of Press Fits of Dissimilar Materials Using the Finite Element Method], *Vychislitelnye tekhnologii [Computational Technologies]*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 12–23. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.4 (In Russian)
14. Bogdanov V. M. Razvitie konstrukcij i metodov rascheta uzlov treniya kolesno-motornykh blokov lokomotivov [Development of Designs and Calculation Methods for Friction Units in Wheel-Motor Blocks of Locomotives], Moscow, Transport, 2005, 188 p. (In Russian)
15. Croccolo D., Agostinis M. De, Fini S. Influence of the Fitting Temperature and Parameters on the Load Capacity of Interference Fits, *Metric Mechanics and Design*, 2020, vol. 142, pp. 105–114.
16. Zhang Y., Liu X. Finite Element Analysis of Multi-Layered Interference Fits Under Thermal-Mechanical Coupling, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, vol. 36, no. 5, pp. 2341–2349.
17. Pedersen P. T. On the Design and Optimization of Multi-Layered Shrink Fits with Thermal Constraints, *International Journal of Solids and Structures*, 2021, vol. 210, pp. 45–56.
18. Kolesnikov I. V. Tribologiya i mekhanika kontaktnogo vzaimodejstviya uzlov treniya podvizhnogo sostava [Tribology and Mechanics of Contact Interaction of Friction Units in Rolling Stock]. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2021, 210 p. (In Russian)
19. Ansys Mechanical User's Guide. Release 2022 R1. Canonsburg: Ansys, Inc., 2022, 1854 p. URL: ansys.com (accessed: May 29, 2026).
- Дата поступления: June 03, 2026
Решение о публикации: July 09, 2026
- Author's information:**
Sergey V. KROTOV — PhD in Engineering, Associate Professor; svk-19587@yandex.ru

УДК 331.103.2: 629.4.072.5

О применении методов статистического анализа при определении времени следования локомотивных бригад пассажиром

О. В. Сенин

Дирекция тяги — филиал ОАО «РЖД», Россия, Москва, 105064, Басманный тупик, ба, стр. 4

Для цитирования: Сенин О. В. О применении методов статистического анализа при определении времени следования локомотивных бригад пассажиром // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 649–655. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-649-655

Аннотация

На продолжительность следования локомотивных бригад пассажиром влияет множество факторов. При этом данные о времени следования бригад по дирекциям образуют временной ряд — его можно анализировать и прогнозировать с помощью статистических инструментов. В статье представлено построение математических моделей на базе временных рядов с применением методов статистического анализа. Кроме того, предложена математическая модель, позволяющая автоматизировать соответствующие расчеты. **Цель:** методами статистического анализа и прогнозирования получить математическую модель предиктивного расчета времени следования локомотивных бригад пассажиром для прогнозирования расходов Дирекции тяги и избежания кассовых разрывов. **Методы:** построение тренд-сезонной мультипликативной математической модели, построение математической модели Хольта — Уинтерса, определение корреляционных зависимостей между рядами данных, построение модели множественной линейной регрессии. **Результаты:** рассмотрены математические модели — тренд-сезонная мультипликативная, Хольта — Уинтерса, определены в детализации по железным дорогам корреляционные зависимости качественных и количественных показателей с временем следования локомотивных бригад пассажиром. **Практическая значимость:** выбранная математическая модель может быть применена для прогнозирования времени следования локомотивных бригад на предстоящий период для учета при бюджетировании Дирекции тяги.

Ключевые слова: прогнозирование работы локомотивных бригад, следование пассажиром, непроизводительные потери, инструменты статистики

Предпосылки для статистического анализа времени следования локомотивных бригад

В ОАО «РЖД» для оценки качества организации работы локомотивных бригад применяется параметр «непроизводительные потери рабочего времени локомотивных бригад» — время, когда локомотивная бригада формально находится на рабочем месте, при этом не осуществляет полезной работы.

К непроизводительным потерям рабочего времени относятся:

1. Превышение установленных нормативов оборота локомотивных бригад в грузовом движении — суммарное превышение установленного нормативного времени выполнения необходимых технологических операций по элементам бригадного оборота (в данной статье подробно не рассматривается).

2. Следование локомотивных бригад пассажиром — время перемещения локомотивных бригад на участке работы локомотивных бригад (УРЛБ) с одной технической станции на другую в вагоне пассажирского или пригородного поезда, в нерабочей кабине грузового локомотива, на служебном автомобиле и т. д.

Эффективное управление непроизводительными потерями рабочего времени локомотивных бригад значительно оптимизирует расходы железнодорожной монополии. При этом следует отметить, что прямые затраты, к которым приводят непроизводительные потери, относятся к фонду оплаты труда (ФОТ) и должны быть выплачены работникам в полном объеме.

При этом качественный прогноз непроизводительных потерь рабочего времени позволит оптимально спланировать бюджет Дирекции тяги, избегая кассовых разрывов. В статье рассмотрена возможность применения методов статистического анализа и прогнозирования при управлении непроизводительными

потерями рабочего времени локомотивных бригад.

По данным отчетности ОАО «РЖД» [1], сформированы временные ряды данных о следовании локомотивных бригад пассажиром по всем железным дорогам. Для примера на рис. 1 приведен временной ряд данных по следованию локомотивных бригад Октябрьской дирекции тяги пассажиром.

Определение корреляционных зависимостей

Следование локомотивных бригад пассажиром является следствием влияния на перевозочный процесс многих факторов. К таким факторам относятся непарность движения поездов, отказы технических средств, ошибки в управлении движением, заболевания локомотивных бригад в пункте оборота и др. Общее влияние факторов возможно оценить через отдельные качественные и количественные показатели работы железнодорожного транспорта.

Первичный анализ статистических отчетов ОАО «РЖД» [1] и сформировавшаяся



Рис. 1. Временной ряд данных по следованию локомотивных бригад Октябрьской дирекции тяги пассажиром

в ОАО «РЖД» практика оценки динамики непроизводительных потерь рабочего времени локомотивных бригад к уровню прошлого года в сопоставимых на объем тонно-километровой работы условиях позволяют сформировать ряд гипотез о том, что время следования локомотивных бригад грузового движения изменяется:

- пропорционально изменению объема тонно-километровой работы;
- в обратной пропорции от участковой скорости в грузовом движении с учетом движения по многопарковым станциям грузового поезда;
- пропорционально изменению рабочего парка грузовых вагонов в среднем в сутки.

Такие показатели, как среднесуточная производительность локомотива эксплуатируемого (рабочего) парка, в данном случае не рассматривались, так как являются производными от участковой скорости в грузовом движении и среднего веса поезда.

С помощью инструментов MS Excel определены коэффициенты корреляции между перечисленными показателями и временем следования локомотивных бригад пассажиром, что позволяет сделать следующие выводы:

1. Низкий коэффициент корреляции между объемом тонно-километровой работы и временем следования локомотивных бригад пассажиром, наличие как положительных, так и отрицательных коэффициентов по железным дорогам свидетельствуют об отсутствии прямой взаимосвязи между показателями.

2. По 14 железным дорогам из 16 коэффициент корреляции указывает на сильную обратную зависимость между участковой скоростью и временем следования локомотивных бригад пассажиром. Это объясняется тем, что локомотивные бригады при снижении участковой

скорости могут не доезжать до конца участка работы и производить смену на промежуточных станциях.

3. Наблюдается прямая корреляционная зависимость рабочего парка вагонов и времени следования пассажиром по железным дорогам. При этом указанная зависимость неоднородна: на отдельных железных дорогах эта зависимость является сильной (Горьковская, Куйбышевская, Красноярская, Дальневосточная), на отдельных — слабой (Октябрьская, Восточно-Сибирская). На большинстве железных дорог корреляционная зависимость является заметной.

Для дальнейшего составления модели множественной линейной регрессии на основе выявленных корреляционных зависимостей рассматриваются параметры участковой скорости и наличия рабочего парка вагонов.

Параметр объема тонно-километровой работы в расчете модели не применяется из-за слабой корреляционной зависимости.

Построение математических моделей

Для прогнозирования времени следования локомотивных бригад пассажиром построены следующие математические модели:

- тренд-сезонная мультипликативная модель с учетом выявленных корреляционных зависимостей (рис. 2);
- модель множественной линейной регрессии (рис. 3);
- модель Хольта — Уинтерса (рис. 4).

Как видно из графиков, модель множественной линейной регрессии и модель Хольта — Уинтерса практически повторяют временной ряд фактических данных.

Итоги использования математических моделей для прогнозирования на 2026 год приведены на рис. 5.

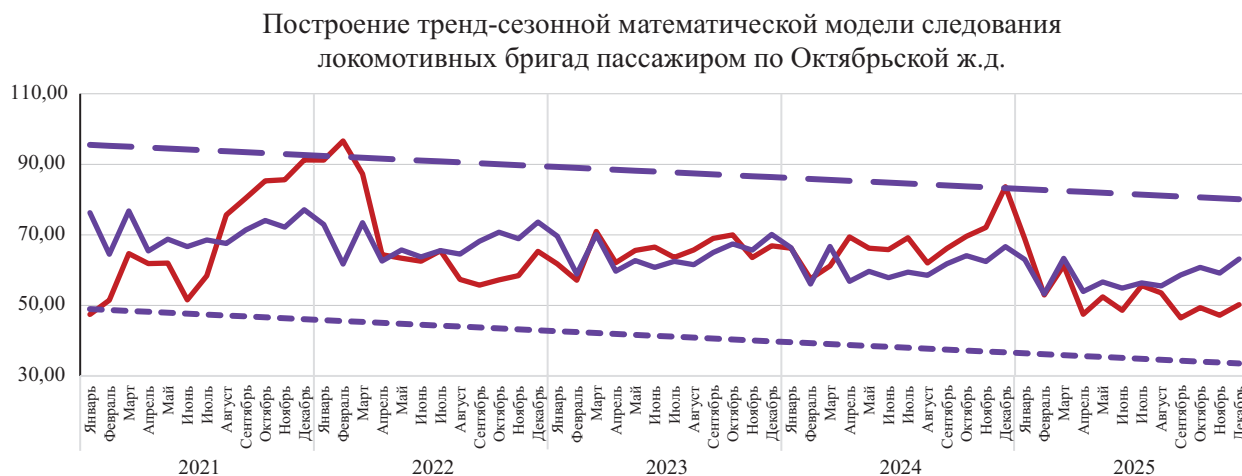


Рис. 2. Тренд-сезонная мультипликативная модель



Рис. 3. Математическая модель множественной линейной регрессии следования локомотивных бригад Октябрьской дирекции тяги пассажиром

Точность прогноза была оценена с применением показателя средней абсолютной процентной ошибки MAPE.

Наиболее точный прогноз отмечается для математической модели множественной регрессии, построенной по фактическим значениям влияющих параметров (MAPE = 9,0%). Однако применение данной математической модели на практике возможно лишь после по-

лучения фактических значений, что значительно снижает область ее применения.

Модель множественной регрессии, построенной по плановым значениям влияющих параметров (MAPE = 22,9%), является гораздо менее точной из-за особенностей формирования плановых показателей.

Прогнозные параметры тренд-сезонной мультипликативной модели показывают



Рис. 4. Модель Хольта — Уинтерса для времени следования пассажиром локомотивных бригад Октябрьской ж/д

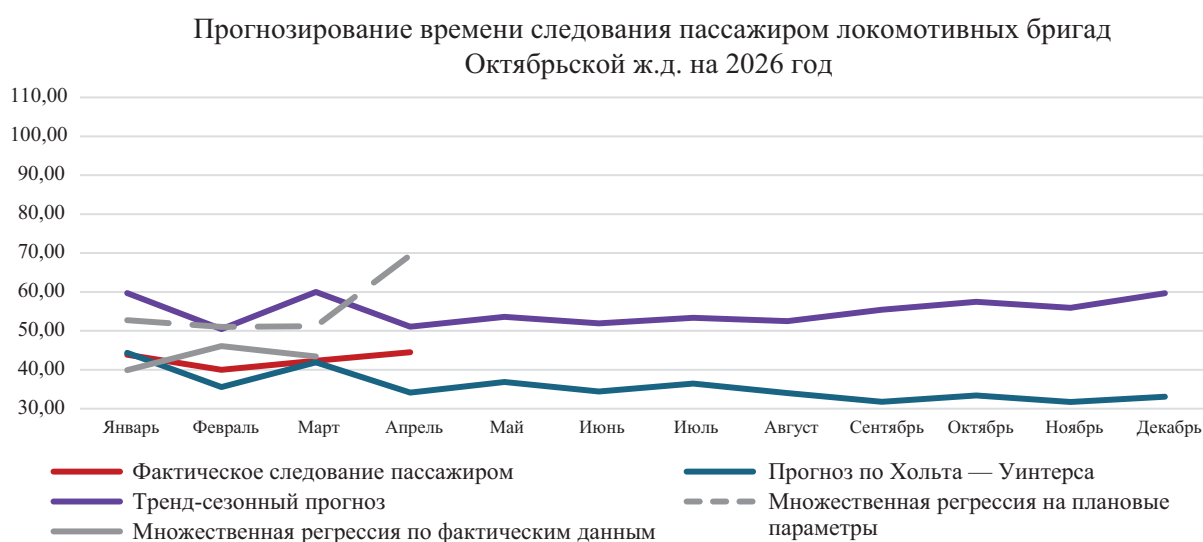


Рис. 5. Прогнозирование времени следования локомотивных бригад Октябрьской дирекции тяги на 2026 год

наибольшее отклонение от фактических параметров ($MAPE = 129,7\%$), что свидетельствует о недостаточном качестве описания моделью происходящих процессов. Ее дальнейшее применение можно признать нецелесообразным.

Прогнозные значения по модели Хольта — Уинтерса показывают одно из наименьших отклонений от фактических значений

($MAPE = 9,13\%$), при этом прогнозный расчет не зависит от наличия дополнительных параметров.

Для дальнейшего использования целесообразно применять модель Хольта — Уинтерса, так как эта модель показывает наименьшие среднеквадратичные отклонения по большинству железных дорог, а также одно из наименьших значений $MAPE$ при прогнозировании.

Выводы

Для автоматизированного прогнозирования времени следования локомотивных бригад пассажиром в детализации по железным дорогам целесообразно применять математическое моделирование Холта — Уинтерса.

По Калининградской и Западно-Сибирской железным дорогам требуется поиск дополнительных параметров, влияющих на время следования локомотивных бригад пассажиром.

Предложения

Включить математическую модель прогнозирования времени следования локомотивных бригад пассажиром в единую сетевую модель управления активами локомотивного хозяйства для эффективного планирования человеческих ресурсов и принятия регулирующих мер, направленных на снижение потерь [3].

Условия сопоставимости при определении динамики непроизводительных потерь рабочего времени локомотивных бригад к уровню прошлого года определять исходя из параметров, имеющих более сильную корреляционную за-

висимость: участковой скорости движения поездов или рабочего парка грузовых вагонов.

Список источников

1. Статистические отчеты о результатах деятельности на инфраструктуре ОАО «РЖД» за период с января 2021 по декабрь 2025 года: электронный ресурс / ОАО «РЖД». URL: <https://company.rzd.ru/ru/9471?ysclid=mt7ldgf7l417644549> (дата обращения: 24.08.2026).

2. Курбыко И. Ф., Левизов А. С., Левизов С. В. Методы прикладной статистики: учеб. пособие. Владимир: Владимирский государственный университет, 2018. 184 с.

3. Михальчук Н. Л. О направлениях цифровой трансформации в локомотивном комплексе // Железнодорожный транспорт. 2019. № 5. С. 35–38.

Дата поступления: 10.06.2026

Решение о публикации: 11.07.2026

Контактная информация:

СЕНИН Олег Викторович — заместитель начальника отдела развития Дирекции тяги, филиала ОАО «РЖД»; senin-ov@mail.ru

On the Use of Statistical Analysis Methods in Determining the Travel Time of Locomotive Crews

O. V. Senin

Locomotive Division OJSC Russian Railways, 6a, bldg. 4 Basmanny tupik, Moscow, 105064, Russia

For citation: *Senin O. V. On the Use of Statistical Analysis Methods in Determining the Travel Time of Locomotive Crews // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 649–655. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-649-655 (In Russian)*

Abstract

Many factors affect the length of time a passenger travels for locomotive crews. At the same time, the data on the time of the brigades' movement through the directorates form a time series — it can be analyzed and predicted using statistical tools. The article presents the construction of mathematical models based on time series using statistical analysis methods. In addition, a mathematical model is proposed that makes it

possible to automate the corresponding calculations. **Objective:** using statistical analysis and forecasting methods, to obtain a mathematical model for predictive calculation of passenger travel time for locomotive crews in order to predict the expenses of the Traction Directorate and avoid cash gaps. **Methods:** construction of a trend-seasonal multiplicative mathematical model, construction of a mathematical Holt — Winters model, determination of correlations between data series, construction of a multiple linear regression model. **Results:** mathematical models of trend-seasonal multiplicative, Holt-Winters have been considered, and correlations of qualitative and quantitative indicators with the passenger travel time of locomotive crews have been determined in railway detail. **Practical significance:** the selected mathematical model can be used to predict the travel time of locomotive crews for the upcoming period to be taken into account in the budgeting of the Traction Directorate.

Keywords: forecasting the work of locomotive crews, passenger tracking, unproductive losses, statistical tools

References

1. Statisticheskie otchety o rezultatah deyatelnosti na infrastrukture OAO “RZhD” za period s yanvarya 2021 po dekabr' 2025 goda. [Statistical Reports on the Performance Results at the Infrastructure of JSC Russian Railways for the Period from January 2021 to December 2025], JSC Russian Railways: electronic resource. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9471?ysclid=mt71dgf7l417644549> (accessed: August 24, 2026). (In Russian)
2. Kurbyko I. F., Levizov A. S., Levizov S. V. *Metody prikladnoj statistiki: uchebnoe posobie* [Methods of Applied Statistics: A Textbook], Vladimir, Vladimir State University, 2018, 184 p. (In Russian)

3. Mikhalechuk N. L. O napravleniyah cifrovoj transformacii v lokomotivnom komplekse [On the Directions of Digital Transformation in the Locomotive Complex], *Zheleznodorozhnyj transport [Railway Transport]*, 2019, no. 5, pp. 35–38. (In Russian)

Received: June 10, 2026

Accepted: July 11, 2026

Author's information:

Oleg V. SENIN — Deputy Head of the Development Department of the Traction Directorate, Branch of JSC Russian Railways; senin-ov@mail.ru

УДК 625.141.1

Стендовые испытания полномасштабных моделей балластной призмы железнодорожного пути при различной степени загрязнения щебня угольной пылью

А. В. Качалкин, А. Ф. Колос

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

Для цитирования: Качалкин А. В., Колос А. Ф. Стендовые испытания полномасштабных моделей балластной призмы железнодорожного пути при различной степени загрязнения щебня угольной пылью // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 656–667. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-656-667

Аннотация

Цель: исследование процесса накопления остаточных деформаций в балластной призме при различном уровне ее загрязнения угольной пылью с последующим определением срока службы балласта. **Методы:** проведение стендовых динамических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы. Циклическая нагрузка, имитирующая воздействие от тяжеловесного подвижного состава, передавалась на балластный слой через железобетонную полушпалу с установленным на ней рельсом типа Р65. В ходе испытаний регистрировались осадки полушпалы по мере увеличения количества циклов приложенной нагрузки. **Результаты:** увеличение степени загрязнения щебня угольной пылью в увлажненном состоянии сопровождается более интенсивным ростом остаточных деформаций в балластном слое. **Практическая значимость:** исследование дает возможность оценить влияние загрязнения щебеночного балласта угольной пылью на интенсивность накопления остаточных деформаций пути, что позволяет решить задачу по определению срока службы щебеночного балласта.

Ключевые слова: железнодорожный путь, щебеночный балласт, угольная пыль, тяжеловесный состав, засорение и загрязнение, остаточная деформация, срок службы, стендовые динамические испытания

Введение

Балластный слой железнодорожного пути должен обеспечивать вертикальную и горизонтальную устойчивость рельсошпальной решетки при воздействии нагрузок, возникающих от движущегося подвижного состава. Применение материалов для балластного слоя, имеющих недостаточную несущую способность, может привести к неравномерным осадкам, толчкам и перекосам пути [1]. В настоящее время применяемым материалом для балластной призмы железнодорожного пути

является щебень из твердых горных пород. На ранее уложенных путях можно встретить балластный слой из сортированного гравия или асбеста, однако в настоящее время данные материалы почти не применяются и при проведении реконструкции либо капитального ремонта пути они должны быть заменены на щебень [2, 3]. Переход на щебеночный балласт связан с тем, что он обладает более высокой прочностью, а также хорошими фильтрационными свойствами по сравнению с гравием и асбестом [4].

Однако длительность службы балластного слоя зависит не только от правильного выбора материала, но и от его состояния, в частности от уровня засорения и загрязнения [5]. Из [4, 6] известно, что при эксплуатации железнодорожного пути в балластном слое появляются как внутренние засорители и загрязнители (продукты собственного дробления), так и внешние, которые попадают в балласт из-за просыпания и протечек перевозимых грузов (например, угольной пыли, мазута, локомотивного песка и других веществ).

Загрязнение щебеночного балласта сопровождается ростом его водоудерживающей способности (влажности). В исследовании [7] установлено, что ввиду своей большой пористости чистый щебень практически не аккумулирует воду, в связи с чем его максимальная водоудерживающая способность составляет не более 1 %. Загрязнение щебня мелким песком (с размером фракций 0,1–0,5 мм) в количестве 40 % по массе приводит к увеличению его водоудерживающей способности до 7,2 %. А при загрязнении балластного слоя в таком же количестве угольной пылью (с размером фракций менее 0,1 мм) влажность щебня достигает 19 %.

Повышение влажности загрязненного щебеночного балласта приводит к интенсивному снижению его прочностных и деформационных свойств. Xu Zhang и др. [8] провели прочностные испытания на сдвиг с образцами щебня, загрязненными сухим песком, а также с образцами, загрязненными угольной пылью. Результаты показали, что угол внутреннего трения уменьшается незначительно с увеличением содержания сухого загрязнителя в образцах. Так, при загрязнении песком угол внутреннего трения в среднем снижался на 4 %, а при загрязнении угольной пылью — на 8 %.

В исследовании [9] было установлено, что наиболее существенное снижение прочност-

ных свойств загрязненного щебеночного балласта происходит, когда степень его водонасыщения $S_r > 0,80$, при таком состоянии грунтов балластного слоя угол внутреннего трения в среднем снижается на 7–10 %, а удельное сцепление — на 35–48 %.

Что касается деформационных свойств щебеночного балласта, то в работе [10] было установлено, что модуль упругости E_{ur} для чистого щебеночного балласта практически не зависит от влажности и составляет 200–275 МПа как в сухом, так и во влажном состоянии. Для загрязненной балластной призмы наблюдается иная тенденция. Так, при наличии в зерновом составе щебня-загрязнителя в сухом состоянии модуль упругости балласта достигает 340–380 МПа, что в 1,7 раза больше, чем у чистого щебня. Авторы объясняют данное явление снижением пористости балласта за счет заполнения пор загрязнителем и, соответственно, увеличением плотности. Однако наличие влаги ведет к значительному снижению модуля упругости до значений 135–170 МПа, что свидетельствует об увеличении упругих деформаций в балластном слое. Это согласуется с выводами, полученными в работах [9, 11, 12].

Из вышесказанного следует, что прочностные и деформационные характеристики щебня напрямую зависят от уровня его засорения и загрязнения, вида загрязнителя и засорителя, а также их влажности. При снижении механических свойств щебеночного балласта как сыпучего материала процесс накопления остаточных деформаций в балласте под шпалой будет интенсифицироваться.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что существует большое количество работ, посвященных изучению физико-механических свойств щебеночного балласта при различном уровне его засорения и загрязнения. При этом практически нет

исследований, как будет изменяться процесс накопления остаточных деформаций в щебеночном балласте при различных уровнях его загрязнения угольной пылью в увлажненном состоянии, что характерно для условий эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Это затрудняет выбор наиболее подходящих разработанных математических моделей для прогнозирования остаточных деформаций и, соответственно, усложняет решение задачи по определению срока службы щебеночного балласта.

В связи с вышеизложенным представляет научный и практический интерес изучение процесса накопления остаточных деформаций с нагрузкой тоннажа в полномасштабной модели балластной призмы при различных уровнях загрязнения щебня угольной пылью в увлажненном состоянии.

Материалы для исследования

Для формирования балластной призмы был выбран гранитный щебень II категории по ГОСТ 7392-2014 [13] со следующими параметрами гранулометрического состава:

$$d_{50} = 42 \text{ мм}; C_u = 1,63; C_c = 0,94,$$

где C_u — коэффициент неоднородности гранулометрического состава, определяемый по формуле (1);

d_{50} — средний диаметр частиц, определяемый по кривой фактического гранулометрического состава как диаметр частиц, меньше которых в грунте содержится 50 % по массе зерен;

C_c — коэффициент, характеризующий форму кривой гранулометрического состава, определяемый по формуле (2).

Гранулометрический состав щебня, используемого в данных испытаниях, представлен на рис. 1:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (1)$$

где d_{60} и d_{10} — диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится соответственно 60 и 10 % по массе зерен, мм.

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}}, \quad (2)$$

где d_{60} , d_{30} и d_{10} — диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится соответственно 60, 30 и 10 % по массе зерен, мм.

Согласно [14, 15], уголь занимает одно из ведущих мест среди грузов, перевозимых железнодорожным транспортом в России, и зачастую балластный слой железнодорожного пути оказывается загрязненным угольной пылью. По этой причине в настоящих испытаниях загрязнение балластной призмы осуществлялось с использованием угольной пыли фракции менее 0,1 мм 100 % по массе.

Применяемое оборудование для проведения испытаний

Испытания полномасштабных моделей балластной призмы проводились в Механической лаборатории им. профессора Н. А. Белелюбского в ПГУПС на стендовой установке (пульсаторе) Amsler HB 250 (рис. 2). Данная установка позволяет моделировать циклическое воздействие от подвижного состава.

Программа и методика проведения испытаний

Исследование процесса накопления остаточных деформаций в балластном слое при различном уровне его загрязнения проводилось на двух моделях, каждая из которых представляла собой половину балластной призмы со следующими геометрическими характеристиками: ширина плеча балластной призмы

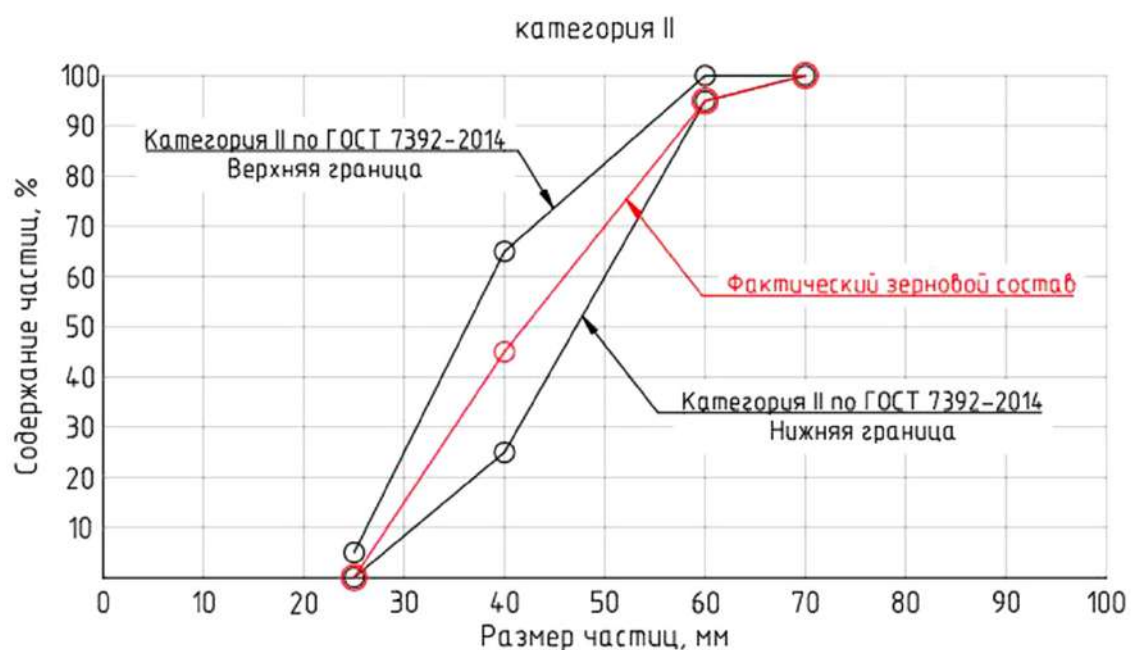


Рис. 1. Гранулометрический состав гранитного щебня II категории, применяемого в данном исследовании



Рис. 2. Стендовая установка (пульсатор) Amsler HB 250: 1 — металлический ящик размером $2700 \times 1000 \times 500$ мм, в котором устраивается модель балластной призмы; 2 — рама; 3 — нагрузочное устройство; 4 — пульт управления

$l = 45$ см, толщина балластного слоя под шпалой $h = 40$ см, крутизна откоса 1:1,5. В первой модели загрязнение щебня угольной пылью составляло 6% по массе, во второй — 18% по массе. При этом влажность щебеночного балласта во всех испытаниях была 6%.

Перед формированием балластной призмы на дно металлического ящика (поз. 1 на рис. 2) укладывался упругий мат толщиной 10 мм с модулем деформации 80 МПа, имитирующий земляное полотно. Далее гранитный щебень, загрязненный угольной пылью, укладывался в металлический ящик и доводился до влажности 6%. Укладка производилась в четыре слоя с уплотнением (рис. 3). Высота каждого слоя не превышала 10 см, а уплотнение производилось вручную до плотности не менее $1,65 \text{ т/м}^3$, что соответствует реальной плотности щебеночного балласта в пути. При достижении требуемой толщины балластного слоя под подошвой шпалы поверхность балласта выравнивалась. На нее укладывалась железо-

бетонная полушпала длиной 1,35 м с установленным на ней рельсом типа Р65. Далее выполнялись работы по засыпке загрязненным и увлажненным щебнем торца шпалы, а также застенного пространства с формированием плеча и откоса балластной призмы. Крутизна откоса контролировалась специально изготовленным шаблоном. Сформированная таким образом конструкция балластной призмы была готова к проведению испытаний (рис. 4).

На следующем этапе через нагрузочное устройство стендовой установки (поз. 3 на рис. 2) передавалась циклическая нагрузка, действующая на рельс со шпалой. Значение вертикальной динамической силы на шпалу Q (кН) определялось в соответствии с [16].

В качестве исходных данных для расчета принималось, что длина поезда — 1050 м, нагрузка на ось полувагона составляет 27 т, количество осей в поезде — 284, скорость движения грузового поезда — 90 км/ч. По результатам расчетов в данных испытаниях нагрузка на



Рис. 3. Послойная отсыпка загрязненного щебня с увлажнением

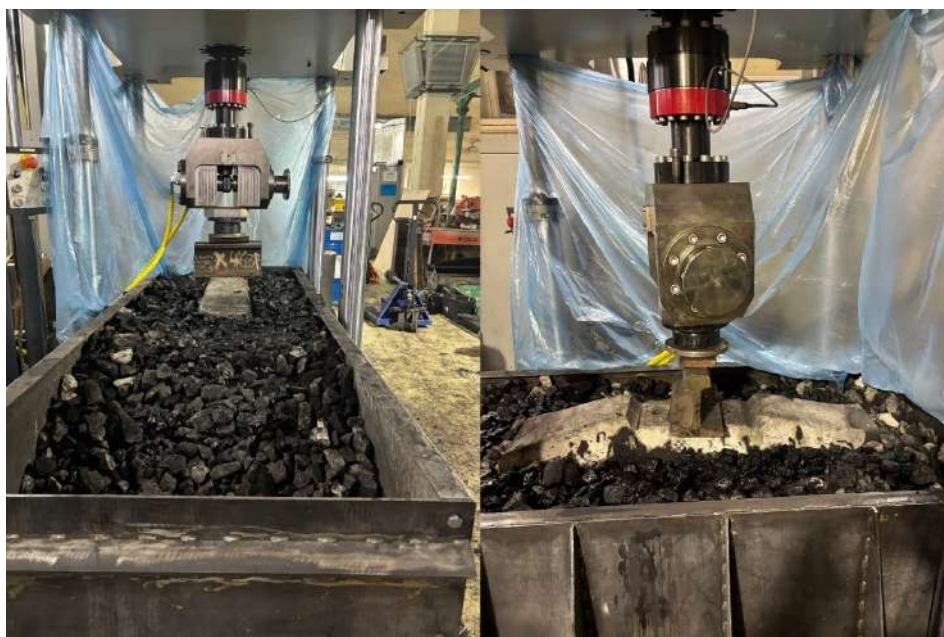


Рис. 4. Сформированная конструкция загрязненной балластной призмы для проведения испытания

половину шпалы Q , передаваемая через рельс, была принята 75 кН. В результате каждый цикл нагрузки в процессе проведения стендовых циклических испытаний был эквивалентен 27 т брутто пропущенного груза. Продолжительность воздействия подвижного состава на путь при его заданной скорости и длине равна 42 с. С учетом вышеизложенного частота приложения нагрузки в данных испытаниях принималась равной $(284/42) \approx 7$ Гц.

Количество циклов нагрузки к полушпале с установленным на ней рельсом составляло 2 млн для каждой исследуемой модели балластной призмы. В ходе испытаний регистрировались остаточные осадки краев (в четырех точках) железобетонной полушпалы, на основании которых вычислялась ее средняя осадка.

Результаты испытаний и анализ

Результаты стендовых циклических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что увеличение содержания угольной пыли в щебне способствует интенсификации процесса накопления остаточных деформаций в балластном слое. Так, в балластной призме, загрязненной угольной пылью в количестве 6% по массе при влажности 6%, осадка полушпалы составила 12 мм. При загрязнении балластной призмы угольной пылью 18% по массе и той же влажности осадка составила 21 мм, что в 1,8 раза больше по сравнению с 6% загрязнения.

Стоит также отметить, что загрязненный угольной пылью щебеночный балласт (6% по массе) демонстрирует снижение скорости накопления остаточных деформаций после 1,2 млн циклов приложения нагрузки, в то время как при загрязнении 18% по массе остаточные осадки полушпалы происходят гораздо интенсивнее и практически с постоянной скоростью на протяжении всего испытания.

В работе [6] представлены результаты аналогичных циклических стендовых испытаний

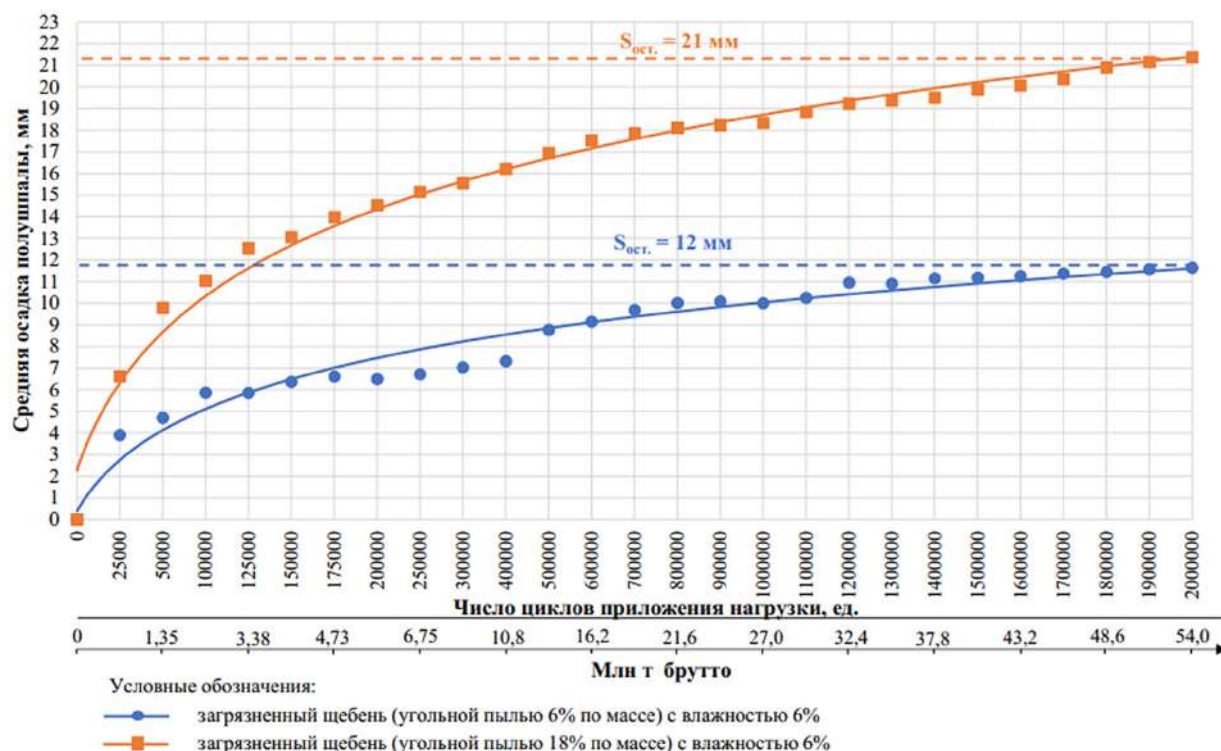


Рис. 5. Результаты стендовых циклических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы, загрязненных угольной пылью

по исследованию накопления остаточных деформаций в полномасштабной модели балластной призмы из чистого щебня II категории по [13] при действии вертикальной динамической нагрузки, эквивалентной 25–27 тс/ось. На рис. 6 сопоставлены результаты настоящей работы с результатами исследования, приведенными в [6].

Анализ рис. 6 показывает, что загрязнение щебня угольной пылью до 6 % по массе оказывает незначительное влияние на развитие остаточных деформаций в балласте, так как для чистого щебеночного балласта осадка полушпалы после 2 млн циклов приложения нагрузки составила 11 мм, а в балластной призме с массовой долей загрязнителя (угольной пыли) 6 % и при влажности 6 % — 12 мм. При этом дальнейшее увеличение содержа-

ния угольной пыли в щебне способствует более интенсивному развитию остаточных деформаций в балластном слое, поскольку загрязнитель забивает поровое пространство и в увлажненном состоянии выступает в роли смазки, тем самым снижая зацепление частиц друг с другом.

На сегодняшний день в нормативной литературе [2, 3, 17] отсутствуют регламенты, касающиеся допускаемых остаточных деформаций в балластном слое железнодорожного пути. В инструкции [18] приводятся нормативы в части отступлений геометрии рельсовой колеи по уровню (перекосы и плавные отклонения уровня), а также просядок рельсовых нитей в вертикальной плоскости. Отступления I, II степени не требуют ограничения скоростей движения поездов и могут быть устранены в плановом

порядке. Отступления III и IV степени угрожают безопасности движения поездов и должны устраняться незамедлительно. Так, например, на рис. 7 в соответствии с [3] представлена схема проведения ремонтных работ для железнодорожных линий, имеющих специализацию «особогрузонапряженная».

Участки железнодорожных путей с большим количеством отступлений II степени требуют проведения планово-предупредительной выправки. Согласно инструкции [18], отступлением II степени являются просадки величиной 13 мм и более. Предположим, что вследствие загрязнения щебеночного балласта угольной

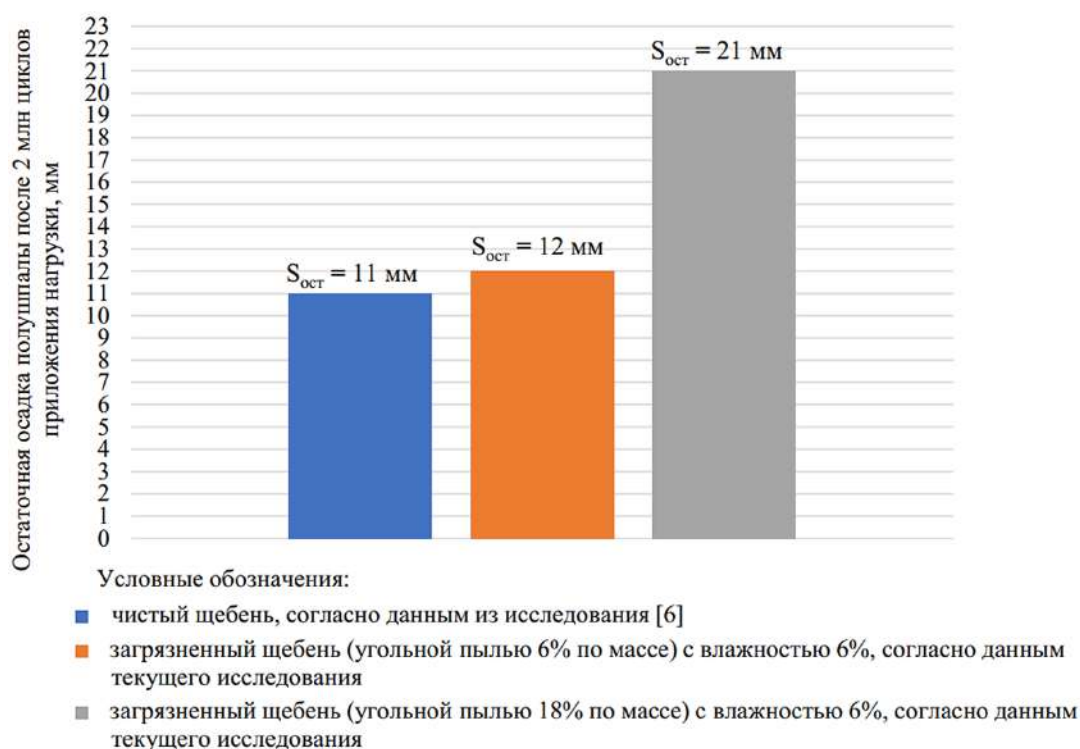


Рис. 6. Сопоставление результатов испытаний различных моделей балластной призмы

КРН – В – С (400) – В – КРН (900)

КРН – капитальный ремонт пути на новых материалах;
 В – планово-предупредительная выправка;
 С – средний ремонт пути;
 (400) – наработанный тоннаж в млн тонн брутто, после которого назначается средний ремонт пути;
 (900) – наработанный тоннаж в млн тонн брутто, после которого назначается капитальный ремонт на новых материалах.

Рис. 7. Схема ремонтных работ для железнодорожных линий, имеющих специализацию «особогрузонапряженная» [3]

пылью в пути образуются неравномерные просадки. Тогда из рис. 5 можно установить, что для балластной призмы с массовой долей угольной пыли 6 % и влажности 6 % при обращении поездов с нагрузками 27 т/ось проведение планово-предупредительной выправки в пределах первых 54,0 млн т брутто не потребуется. В то же время для балласта, загрязненного угольной пылью в количестве 18 % по массе, планово-предупредительную выправку следует проводить уже после наработки тоннажа 4,1 млн т брутто.

Согласно представленной на рис. 7 схеме выполнения ремонтных работ, средний ремонт пути, в рамках которого осуществляется очистка или замена балласта, выполняется после наработки 400 млн т брутто, однако появление отступлений III степени может потребовать его проведения значительно раньше. Так, по данным рис. 5, при загрязнении балласта угольной пылью 18 % по массе и наработке тоннажа 40,5 млн т брутто просадки достигают более 20 мм, что является отступлением III степени и в связи с чем средний ремонт пути может быть назначен ранее установленного схемой ремонта.

Заключение

В ходе проведения стендовых циклических испытаний полномасштабных моделей балластной призмы установлено следующее.

1. Увеличение процентного содержания угольной пыли в щебеночном балласте приводит к росту в нем остаточных деформаций. Так, в балластной призме с массовой долей угольной пыли 6 % (при общей влажности 6 %) накопленная остаточная осадка полушпалы после 2 млн циклов приложения нагрузки составила 12 мм, а при увеличении степени загрязнения до 18 % — 21 мм.

2. Загрязнение щебеночного балласта угольной пылью до 6 % по массе при общей влажности 6 % оказывает несущественное влияние на развитие остаточных деформаций в балластном слое. Дальнейшее увеличение содержания угольной пыли в щебеночном балласте способствует ускоренному процессу накопления в нем остаточных деформаций.

3. При обращении подвижного состава с осевыми нагрузками 27 т/ось на путях с щебеночным балластом, загрязненным угольной пылью в количестве 18 % по массе и общей влажностью 6 %, планово-предупредительную выправку следует проводить уже после наработки тоннажа 4,1 млн т брутто.

4. Загрязнение балластной призмы угольной пылью в количестве 18 % по массе при влажности 6 % может приводить к сокращению срока эксплуатации пути до проведения среднего ремонта с 400 млн т брутто до 40,5 млн т брутто.

Принимая во внимание вышесказанное, можно заключить, что для обеспечения безопасного движения поездов с установленными скоростями в течение заданного срока службы верхнего строения пути необходимо контролировать состояние балластного слоя, в частности степень засоренности и загрязненности, а также своевременно проводить работы по его очистке или замене.

Список источников

1. Варызгин Е. С. Содержание балластной призмы железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1978. 142 с.
2. СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. М., 2024.
3. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.12.2021 №2888/р.

4. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1965. 183 с.
 5. Непомнящий Н. В., Косенко С. А. Анализ работы балластного слоя железнодорожного пути при длительной эксплуатации // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 43–8. С. 52–56.
 6. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2022. Т. 19, вып. 3. С. 558–575. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575
 7. Игошев И. С., Колос А. Ф. Водоудерживающая способность гранитного щебня // Путь и путевое хозяйство. 2025. № 12. С. 12–16.
 8. A Comparison on the Effects of Coal Fines and Sand Fouling on the Shear Behaviors of Railway Ballast Using Large Scale Direct Shear Tests / X. Zhang [et al.] // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2025. Vol. 12. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.09.003
 9. Колос А. Ф. Несущая способность и деформируемость балластного слоя при эксплуатации железнодорожного пути: дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. 637 с.
 10. Use of Seismic Surface Wave Testing to Assess Track Substructure Condition / T. R. Sussmann [et al.] // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1250–1255.
 11. Laboratory Study of the Failure Characteristics of Fouled Ballast: Phase II: Final Report DOT/FRA/ORD-20/04 / A. K. Rohrman [et al.]. Washington, U.S.: Department of Transportation, 2020. 83 p.
 12. Estaire J., Cuellar V., Santana M. Track Stiffness in a Ballast Track Fouled with Desert Sand. 2017.
 13. ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
 14. Такайшвили Л. Н. Восточный полигон железных дорог России для экспорта российского угля: перспективы развития и ограничения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 12. С. 41–55. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502
 15. Хусаинов Ф. И., Ожерельева М. В. Перевозки угля и нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: текущее состояние и перспективы // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2019. № 4 (83).
 16. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706/р. М.: ОАО «РЖД», 2017. 97 с.
 17. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288/р. М.: ОАО «РЖД», 2016. 286 с.
 18. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р (в ред. от 09.11.2020 с изм. от 01.04.2021).
- Дата поступления: 10.06.2026
Решение о публикации: 03.07.2026
- Контактная информация:**
КАЧАЛКИН Андрей Вячеславович — аспирант;
andrew.kachalkin1999@mail.ru
КОЛОС Алексей Федорович — доктор техн. наук,
профессор; kolos2004@inbox.ru

Large-Scale Box Tests of Ballast Layer with Varying Degrees of Coal Dust Contamination of Crushed Stone

A. V. Kachalkin, A. F. Kolos

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

For citation: Kachalkin A. V., Kolos A. F. Large-Scale Box Tests of Ballast Layer with Varying Degrees of Coal Dust Contamination of Crushed Stone // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 656–667. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-656-667 (In Russian)

Abstract

Objective: to investigate the process of accumulation of residual deformations in a ballast prism with different levels of contamination with coal dust, followed by determination the ballast service life. **Methods:** the achievement of the research objective was carried out through large-scale box tests of ballast layer. Cyclic load, simulating the impact of heavy freight train, was transmitted on the ballast layer through reinforced-concrete half-sleeper with rail (R65) installed on it. During the tests, the residual settlement of half-sleeper was recorded as a function of the number of applied load cycles. **Results:** the results of conducted studies showed that increasing the level of crushed stone contamination with coal dust in wet state is accompanied by more intensive growth of residual deformations in the ballast layer. **Practical importance:** the results of the study make it possible to evaluate the impact of coal dust contamination of crushed stone on the intensity of accumulation of residual deformations of the track, which makes it possible to solve the problem of determining the service life of ballast layer.

Keywords: railway track, crushed-stone ballast, coal dust, heavy freight train, clogging and pollution, residual deformation, service life, large-scale box tests

References

1. Varyzgin E. S. Soderzhanie ballastnoj prizmy zheleznodorozhnogo puti [The Content of the Railway Track Ballast Prism], Moscow, Transport, 1978, 142 p. (In Russian)
2. SP 119.13330.2024. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm [SP 119.13330.2024. Railways with a Gauge of 1520 mm], Moscow, 2024. (In Russian)
3. Pravila naznacheniya remontov zheleznodorozhnogo puti [Rules for Scheduling Railway Track Repairs], approved by Order of JSC RZD, dated December 17, 2021, no. 2888/r. (In Russian)
4. Popov S. N. Ballastnyj sloj zheleznodorozhnogo puti [The Ballast Layer of the Railway Track], Moscow, Transport, 1965, 183 p. (In Russian)
5. Nepomnyashchij N. V., Kosenko S. A. Analiz raboty ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti pri dlitel'noj ekspluatatsii [Analysis of the Operation of the Railway Track Ballast Layer under Long-Term Operation], *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education], 2018, no. 43–8, pp. 52–56. (In Russian)
6. 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 putej soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg Transport University], St. Petersburg: Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 558–575. DOI: 10.20295/1815588X20223558575 (In Russian)
7. Igoshev I. S., Kolos A. F. Vodoudерживayushchaya sposobnost' granitnogo shchebnaya [Water

Retention Capacity of Granite Crushed Stone], *Put' i putevoe hozyajstvo [Track and Track Facilities]*, 2025, no. 12, pp. 12–16. (In Russian)

8. Zhang X., et al. A Comparison on the Effects of Coal Fines and Sand Fouling on the Shear Behaviors of Railway Ballast Using Large Scale Direct Shear Tests, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2025, vol. 12. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.09.003

9. Kolos A. F. Nesushchaya sposobnost' i deformiruemost' ballastnogo sloya pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Bearing Capacity and Deformability of the Ballast Layer during Railway Track Operation]. Doctor of Engineering Sciences diss. St. Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2024, 637 p. (In Russian)

10. Sussmann T. R., et al. Use of Seismic Surface Wave Testing to Assess Track Substructure Condition, *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 155, pp. 1250–1255.

11. Rohrman A. K., et al. Laboratory Study of the Failure Characteristics of Fouled Ballast. Phase II: Final Report DOT/FRA/ORD20/04, Washington, U.S., Department of Transportation, 2020, 83 p.

12. Estaire J., Cuellar V., Santana M. Track Stiffness in a Ballast Track Fouled with Desert Sand, 2017.

13. GOST 7392-2014. Shcheben' iz plotnyh gornyh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya [GOST 7392-2014. Crushed Stone from Dense Rocks for the Railway Track Ballast Layer. Technical Specifications], Moscow, Standartinform, 2015, 32 p. (In Russian)

14. Takaishvili L. N. Vostochnyj poligon zheleznih dorog Rossii dlya eksporta rossijskogo uglya: perspektivy razvitiya i ogranicheniya [The Eastern Polygon of Russian Railways for Russian Coal Exports: Development Prospects and Constraints], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engi-*

neering], 2023, vol. 334, no. 12, pp. 41–55. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4502 (In Russian)

15. Khusainov F. I., Ozherel'eva M. V. Perevozki uglya i neftenalivnyh грузов zheleznodorozhnym transportom: tekushchee sostoyanie i perspektivy [Coal and Oil Cargo Transportation by Railway: Current State and Prospects], *Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. Journal on Science, Practice, and Economics]*, 2019, no. 4 (83). (In Russian)

16. Metodika ocenki vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti [Methodology for Assessing the Impact of Rolling Stock on the Track in Terms of Ensuring Reliability], approved by Order of JSC Russian Railways, no. 2706/r, dated December 22, 2017, Moscow, JSC Russian Railways, 97 p. (In Russian)

17. Instrukciya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti [Instruction for the Routine Maintenance of the Railway Track], approved by Order of JSC Russian Railways, dated November 14, 2016, no. 2288/r, Moscow, JSC Russian railways, 2016, 286 p. (In Russian)

18. Instrukciya po ocenke sostoyaniya rel'sovoj kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov [Instruction for Assessing the Condition of the Track Gauge Using Track Measuring Equipment and Measures to Ensure Train Traffic Safety], approved by Order of JSC Russian Railways, dated February 28, 2020, no. 436/r (as amended on November 9, 2020, with changes dated April 1, 2021). (In Russian)

Received: June 10, 2026

Accepted: July 03, 2026

Author's information:

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

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

УДК 656.073

Теоретико-игровая модель стейкхолдеров перевозочного процесса

Д. С. Аскендерова, А. В. Новичихин

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

Для цитирования: Аскендерова Д. С., Новичихин А. В. Теоретико-игровая модель стейкхолдеров перевозочного процесса // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 668–680. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-668-680

Аннотация

Цель: повышение эффективности работы стейкхолдеров на основе теоретико-игрового моделирования. **Методы:** исследование базируется на методах теории активных систем («центр — активные элементы»), теории игр (равновесие Нэша), микроэкономики и многокритериальной оптимизации. **Результаты:** рассмотрены типы операторских компаний, представлены их характеристики, проанализированы работы предшественников, проводивших исследования в части разработки методов организации вагонопотоков на железнодорожном транспорте. Рассмотрены нормативные документы, по которым регламентируется работа операторских компаний и взаимодействие их с участниками перевозочного процесса, представлены иллюстрации в виде алгоритма организации работы операторских компаний. Выявлены недостатки существующей организации работы операторских компаний. С помощью теоретико-игровых моделей представлены недостатки традиционного распределения вагонов. Построена трехкритериальная оптимизационная модель. Установлено, что при внедрении цифрового двойника расширяется Парето-фронт, позволяя улучшать критерии. **Практическая значимость:** модель является методической основой для принятия решений владельцем инфраструктуры. Предложенный подход дает возможность балансировки интересов участников рынка в условиях ограниченной пропускной способности и других ресурсных ограничениях. В перспективе следует продолжить исследование возможности внедрения цифрового двойника на отдельном полигоне; разработать концепцию цифрового двойника для обеспечения подвижным составом с целью повышения пропускной способности и оптимизации организации работы участников процесса в лице стейкхолдеров, операторских компаний, владельца инфраструктуры; детально рассмотреть работу системы цифрового двойника, его структуру, технические характеристики и технологические возможности. Проанализировать, каким образом возможно внедрение цифрового двойника в автоматизированные системы работы железнодорожных станций и полигонов.

Ключевые слова: операторская компания, железнодорожный узел, теоретико-игровая модель, управление процессами перевозок, оптимизационная задача

Введение

Для организации перевозок на железнодорожном транспорте значимой составляющей является обеспечение подвижным составом. Предоставлением подвижного состава для перевозок занимаются как сам перевозчик и его

дочерние компании, так и с 2001 года операторские компании [1]. До 2009 года большая часть вагонов числилась в инвентарном парке ОАО «РЖД» и управлялась напрямую владельцем инфраструктуры, после проведения реформы управления вагонным парком почти весь

подвижной состав перешел в частный парк [2]. На начало 2026 года доля частного парка от общего числа вагонов составила 96,6% [3]. Операторские компании в соответствии с постановлением Правительства РФ «Об утверждении Положения об основах правового регулирования деятельности операторов железнодорожного подвижного состава и их взаимодействия с перевозчиками» от 25 июля 2013 года № 626 делятся на пять категорий (рис. 1) [4]. Кроме того, их можно классифицировать по форме собственности, характеру перевозок, масштабу деятельности, принадлежности, роду перевозимого груза и виду подвижного состава.

Исследованиям различных методов организации вагонопотоков на железнодорожном транспорте были посвящены труды многих авторов, таких как К. О. Валентинов [5], Е. А. Чеботарева [6], И. И. Осьминина [7], А. Т. Осьминин [8], Н. Н. Куценко [9], П. К. Рыбин [10] и др. Несмотря на большое количество работ на тему организации вагонопотоков, требуются дальнейшие исследования, так как вопросы, связанные с совершенствованием обеспечения подвижным составом за счет

внедрения цифрового двойника, почти не затрагивались.

В настоящее время операторские компании заключают договоры с грузоотправителями для последующей заадресовки подвижного состава, только после согласования оформляется заявка на перевозку грузов по форме ГУ-12. Алгоритм работы операторских компаний представлен на рис. 2а и 2б.

На сети железных дорог подвижной состав предоставляют многочисленные операторские компании. Они конкурируют друг с другом, стремясь максимально увеличить собственную прибыль от организации перевозок и одновременно сократить затраты на перевозку, ремонт, пользование инфраструктурой.

Грузоотправители выбирают операторскую компанию, ориентируясь на снижение расходов: они стараются минимизировать затраты как на услуги операторов, так и на пользование инфраструктурой. Владелец инфраструктуры — ОАО «РЖД» — заинтересован в том, чтобы обеспечить ее загрузку и при этом получить максимальную прибыль от сборов за использование инфраструктуры. Чтобы проанализировать влияние каждого участника



Рис. 1. Типы операторских компаний

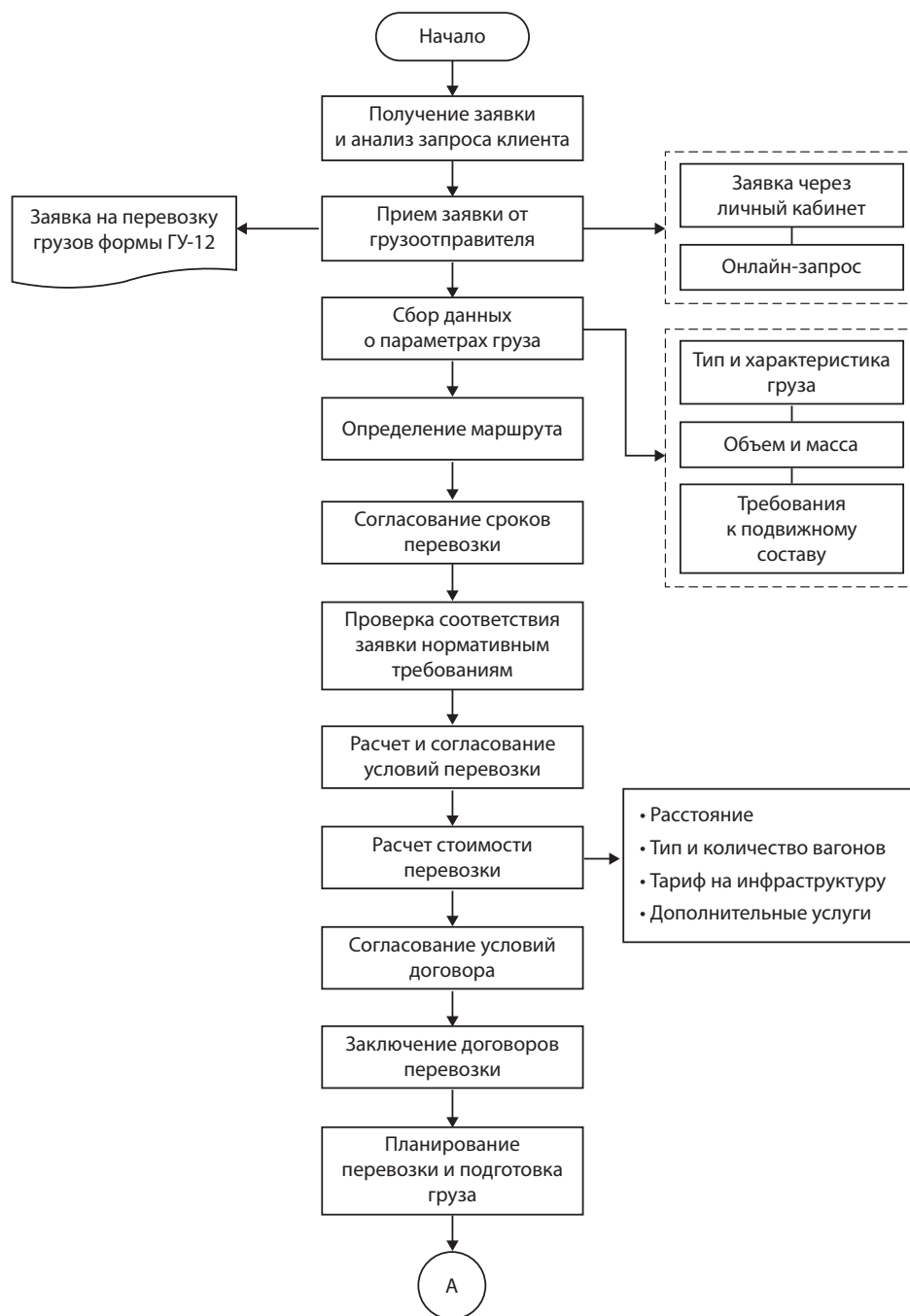


Рис. 2а. Алгоритм работы операторских компаний

процесса, целесообразно представить ситуацию в виде теоретико-игровой модели.

Теоретико-игровая модель базируется на концепции базовой активной системы и представляет собой иерархическую игру типа Г2 [11]. В этой игре роль центра (метаигро-

ка) выполняет владелец инфраструктуры — ОАО «РЖД» (далее — центр). Центр обладает правом первого хода и может самостоятельно определять свою стратегию. Активными элементами (далее — АЭ) системы выступают операторские компании и грузоотправитель.

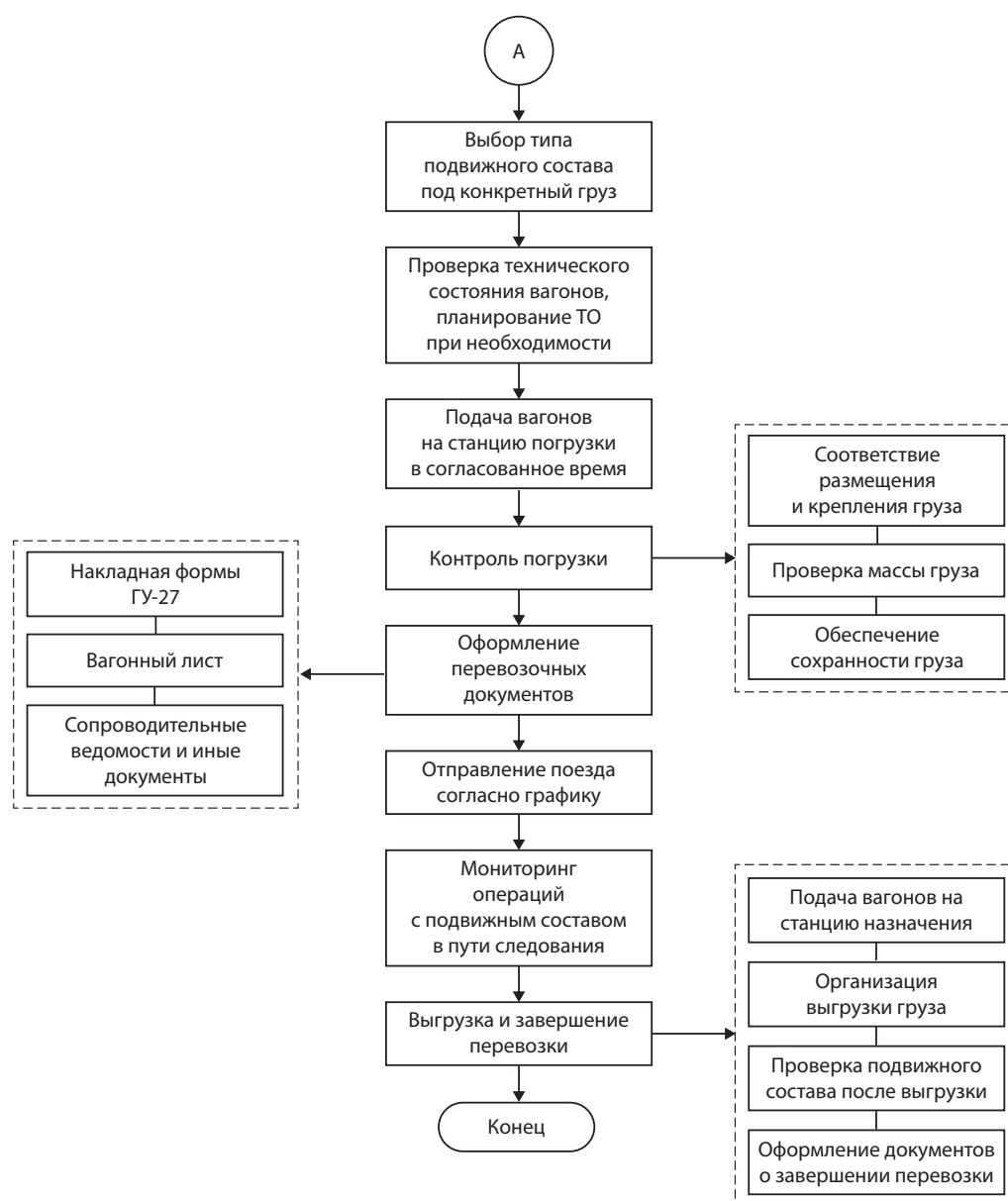


Рис. 26. Алгоритм работы операторских компаний

Центр способен влиять на поведение активных элементов с помощью механизмов стимулирования и санкций. В рассматриваемом случае такими инструментами служат тарифы на пользование инфраструктурой, система скидок, надбавки за объемы перевозимого груза, а также штрафы за нарушение устава железнодорожного транспорта и других нормативных документов.

Активная система (далее — АС) характеризуется слабой связанностью активных элементов: операторские компании не взаимодействуют друг с другом и принимают решения об объемах перевозок независимо от остальных участников.

Следует учитывать, что центр не располагает достоверными данными об истинных затратах операторских компаний и платежеспособности

грузоотправителя. По этой причине в модели применяется подход открытого управления, который позволяет обеспечить неманипулируемость системы.

Активная система функционирует в условиях внешней вероятностной неопределенности. В частности, на ее работу влияют колебания спроса на перевозки и возможные форс-мажорные задержки. В связи с этим целесообразно использовать теорию контрактов.

Для постановки задачи оптимизации работы операторских компаний необходимо определить состав участников, их стратегии и целевые функции.

Участники

1. *Центр* (владелец инфраструктуры на сети железных дорог России, принадлежащих ОАО «РЖД»). Его цель — максимизировать суммарную прибыль от сборов за пользование инфраструктурой при обеспечении максимальной загрузки сети. Центр не знает параметров операторских компаний и грузоотправителей, которые влияют на их функции затрат и доходов.

Центру известны множества возможных типов, где i — это множество операторских компаний Ω_i , а j — множество стейкхолдеров (грузоотправителей/грузополучателей). В модели используется байесовский подход, где каждый из элементов имеет субъективные представления о распределении.

2. *Активный элемент* (операторские компании $I = \{1 \dots n\}$) предоставляет подвижной состав, и основной целью его является максимизация собственной прибыли.

Для каждой операторской компании $i \in I$ определено:

$A_i \subset R_+$ — множество допустимых действий, где $y_i \in A_i$ (y_i — объем перевозок оператора i);

$A_{0i} \subset R_+$ — множество возможных/допустимых результатов, где $z_i \in A_{0i}$ (z_i — фактически перевезенный объем).

Плотность распределения вероятностей результата $p_i(z_i | y_i)$, $y_i \in A_i$, $z_i \in A_{0i}$. При $z_i < Q$ грузоотправитель несет издержки (разница между запланированным объемом перевозимого груза и фактическим) в размере $\lambda(Q - z_i)$, где $\lambda > 0$ — удельные потери от недопоставки груза.

Каждый оператор i имеет тип $r_i \in \Omega_i \subset R$, определяющий параметры его функции затрат $c_i(z_i, r_i)$, где r_i — эффективность оператора.

3. *Активный элемент* (грузоотправитель) — потребность в перевозке объема $Q > 0$. Цель — свести к минимуму затраты на перевозку, а именно затраты на пользование услугами операторских компаний и услуги за пользование инфраструктурой.

Каждый грузоотправитель j имеет тип $r_j \in \Omega_j \subset R$, определяющий параметры его функции дохода $R_j(z_j, \Omega_j)$ и издержек $d_j(z_j, \Omega_j)$.

Стратегии

1. Центр выбирает механизм стимулирования набора функций $\tau_i(z_i)$, определяющий плату за пользование инфраструктурой в зависимости от результата z_i .

Множество функций стимулирования $\tau_i \in B$, где B — класс ограничений сверху и снизу измеримых функций, $\tau_i(z_i) \leq C$.

2. Стратегия операторской компании i — выбор действия $y_i \in A_i$ после того, как центр заявил r_i , но до реализации z_i , $p_i \geq 0$ — цена за единицу перевозки.

3. Стратегия грузоотправителя — выбор оператора $j \in I \cup \{0\}$, где 0 — когда грузоотправитель решил отказаться от перевозки. Принятие решения происходит после того, как центр предоставил тарифы и операторы сформировали цены.

Целевые функции с учетом выбора

Ожидаемые полные затраты грузоотправителя при выборе оператора i

Грузоотправитель минимизирует ожидаемую сумму прямых платежей и штрафов:

$$C_G(i | p_i, y_i, \tau_i) = E_{z_i \sim p_i(\cdot | y_i)} [p_i \cdot Q + \tau_i(z_i) + \lambda(Q - z_i)] \rightarrow \min,$$

где $C_G(i | p_i, y_i, t_i)$ — ожидаемые издержки оператора при заданных p_i, y_i, t_i ;

$E_{z_i \sim p_i(\cdot | y_i)}$ — математическое ожидание величины z_i , распределение которой задано условной плотностью (усреднение издержки по всем возможным реализациям результата z_i при известном y_i ;

$\tau_i(z_i)$ — плата на инфраструктуре (включена в стоимость перевозки для грузоотправителя);

C_G — полная стоимость для грузоотправителя.

Грузоотправитель придерживается минимизации расходов:

$$i = \underset{i \in I}{\operatorname{argmin}} C_G(i)$$

при условии $\min_i C_G(i) \leq U_0$;

U_0 — ограничение по стоимости альтернативных перевозок, если все варианты дороже U_0 , грузоотправитель выбирает опцию 0, то есть отказывается от перевозки.

Ожидаемая прибыль оператора i

Оператор получает прибыль только в том случае, если грузоотправитель выбрал именно его. Поэтому целевая функция имеет вид:

$$\Pi_i(p_i, y_i, \tau_i, p_{-i}, y_{-i}) = \begin{cases} E_{z_i} [p_i Q - c_i(z_i, r_i) - \tau_i(z_i)], & \text{если } i = i(p, y) \\ 0 \end{cases},$$

$c_i(z_i, r_i)$ — затраты оператора на перевозку (зависят от фактического результата и типа r_i). Если грузоотправитель отказывается от перевозки, прибыль всех операторов равна 0.

Ожидаемый доход центра:

$$\Phi(\tau) = E_{i, z_i} [\tau_i(z_i)] - K(E[z_i]),$$

где K — затраты на инфраструктуру (зависят от фактической загрузки).

Порядок функционирования с использованием динамической игры будет выглядеть следующим образом:

1. Центр утверждает тарифную стоимость $\tau_i(z_i)$ для всех операторов.

2. Операторские компании одновременно и независимо выбирают свои стратегии (p_i, y_i) , зная тарифы.

3. Грузоотправитель, зная (p_i, y_i) , вычисляет ожидаемые затраты $C_G(i)$ и выбирает оператора i , минимизирующего их (если это выгоднее альтернативной перевозки).

4. Выбранный оператор i выполняет перевозку.

5. Реализуется произвольный случай $z_i \sim p_i(\cdot | y_i)$.

6. Производятся все платежи: грузоотправитель платит $p_i \cdot Q + \tau_i(z_i) + \lambda(Q - z_i)$, центр получает $\tau_i(z_i)$, операторская компания получает $p_i \cdot Q - c_i - \tau_i$.

В рассматриваемой модели целесообразно применить концепции равновесия Нэша и равновесия Штакельберга, при этом центр выступает в роли лидера.

В данной модели следует использовать равновесие Нэша и Штакельберга с центром в роли лидера. Так, на нижнем уровне для АЭ при фиксированном τ используется равновесие Нэша в стратегиях (p_i, y_i) , где каждый оператор максимизирует свою ожидаемую прибыль

с учетом правила выбора грузоотправителя. На верхнем уровне центр предвидит равновесие нижнего уровня и выбирает τ , максимизируя свою функцию Φ при условии, что равновесие нижнего уровня существует и грузоотправитель не отказался от перевозки.

Для центра следует поставить задачу оптимального стимулирования так:

$$\max_{\tau \in M^n} \Phi(\tau) E_{i, z_i}[\tau_i(z_i)]$$

при следующих ограничениях:

1. Участие грузоотправителя:

$$\min_{i \in I} C_G(i | p_i, y_i, \tau_i) \leq U_0,$$

где (p_i, y_i) — равновесные стратегии операторов при данном τ .

2. Равновесие Нэша.

Для каждого оператора i его стратегия должна быть наилучшим ответом на стратегии остальных:

$$(p_i, y_i) \in \arg \max_{p_i, y_i} \Pi_i(p_i, y_i, \tau_i, p_{-i}, y_{-i}),$$

причем i определяется правилом выбора грузоотправителя.

3. Допустимость $\tau_i \in B$.

Согласно представленной модели центр напрямую не управляет действиями операторов, вместо этого он управляет правилами конкуренции. Центру выгодно не только взимать плату за инфраструктуру, но и формировать тарифную политику так, чтобы обострять ценовую конкуренцию между операторами, одновременно смягчая конкуренцию по надежности с помощью параметров функции стимулирования $\tau_i(z_i)$. Можно сделать вывод, что операторские компании не берут во внимание занятость инфраструктуры и не стремятся свести к минимуму оборот вагона, что отрицательно влияет на распределение вагонопотоков на сети дорог.

Таким образом, одним из решений данной проблемы является внедрение цифрового двойника вагонов на сети железных дорог для повышения пропускной способности и снижения оборота вагона с помощью постановки оптимизационной задачи Парето.

Как описывалось ранее, в расчет берутся три игрока: владелец инфраструктуры, операторские компании и стейкхолдеры (грузополучатели, грузоотправители).

Время оборота вагона зависит от загрузки сети, а также от уровня цифровизации. В данном случае рассматривается внедрение цифрового двойника, тогда:

$$T(Q, \delta) = T_0(\delta) + \beta(\delta) \left(\frac{Q}{C} \right)^v, \quad v \geq 1,$$

где $T_0(\delta)$ — минимальное время оборота вагона при минимальной загрузке (определяется технологией и организацией движения;

$\frac{Q}{C}$ — отношение текущего объема перевозок к пропускной способности;

$\beta(\delta)$ — коэффициент чувствительности оборота к росту загрузки (чем выше загрузка, тем больше задержки);

v — степень нелинейности (при $v = 1$ зависимость линейна, каждая дополнительная единица загрузки увеличивает оборот на одну и ту же величину, при $v > 1$ зависимость выпуклая — чем меньше пропускная способность, тем больше срок оборота вагона).

Внедрение цифрового двойника снижает как T_0 , так и β :

$$T_0(\delta) = T_0^{\text{баз}} (1 - \alpha \delta),$$

$$\beta(\delta) = \beta_0^{\text{баз}} (1 - \gamma \delta),$$

где $T_0^{\text{баз}}, \beta_0^{\text{баз}}$ — базовое время оборота и малой загрузки, базовый коэффициент чувствительности оборота к загрузке ($\delta = 0$);

$\alpha, \gamma \in (0, 1)$ — коэффициенты эффективности цифрового двойника

То есть при использовании цифрового двойника производительность парка:

$$\lambda(Q, \delta) = \frac{365}{T_0^{\text{баз}}(1 - \alpha\delta) + \beta^{\text{баз}}(1 - \gamma\delta) \left(\frac{Q}{C}\right)^v},$$

где λ — производительность единицы парка ($\lambda = 365/T$);

Q — суммарный годовой объем перевозок;

C — пропускная способность сети;

v — показатель нелинейности задержек.

То есть внедрение цифрового двойника оптимизирует распределение вагонов и позволяет сокращать простои, а также снижает T_0 , способствует снижению β , а именно делает сеть менее чувствительной к загрузке.

При поставленных ограничениях объем не может превышать пропускную способность $Q \leq C$.

Тариф должен покрывать переменные затраты владельца инфраструктуры:

$$t(Q, \delta) \geq d,$$

где d — переменные издержки владельца инфраструктуры на единицу перевозки.

Тогда множество всех допустимых решений:

$$D = \{(Q, \delta) \mid Q \leq C, \delta \leq 1, t(Q, \delta) \geq d\},$$

где D — это все реализуемые варианты Q, δ которые подходят по физическим, технологическим и экономическим параметрам.

Внутри данного множества подбираются Парето-эффективные точки, которые позволят максимизировать три критерия: прибыль владельца инфраструктуры, потребительский излишек и производительность парка.

При постановке задачи рассматриваются три критерия:

1. Прибыль владельца инфраструктуры:

$$\Pi(Q, \delta) = (t(Q, \delta) - d) Q - F,$$

где F — постоянные затраты владельца инфраструктуры.

2. Потребительские излишки — мера выгоды грузоотправителей (разница между тем, сколько потребители готовы заплатить за товары и услуги, и тем, сколько фактически заплатят):

$$CS(Q) = \frac{b}{2} Q^2,$$

где a, b — параметры линейного спроса $Q = a - bp$ (p — рыночная цена перевозки для грузоотправителя).

С ростом объема перевозок цена, которую готовы заплатить потребители, убывает линейно, то есть равномерно. Потребительский излишек растет квадратично с объемом: чем больше перевозок, тем больше выгода потребителей, и рост ускоряется. Параметр b (чувствительность спроса к цене) влияет на величину излишка: чем «круче» падает готовность платить, тем больше излишек при том же объеме.

3. Производительность парка отражает скорость оборота и эффективность использования подвижного состава (рассматривается за год):

$$\Lambda(Q, \delta) = \lambda(Q, \delta) = \frac{365}{T(Q, \delta)}.$$

Так, следует найти множество $P \subseteq D$ таких точек (Q^*, δ^*) , для которых не существует допустимой точки $(Q', \delta') \in D$, такой, что

$$\begin{aligned} \Pi(Q', \delta') &\geq \Pi(Q^*, \delta^*), \quad CS(Q') \geq CS(Q^*), \\ \Lambda(Q', \delta') &\geq \Lambda(Q^*, \delta^*) \end{aligned}$$

и хотя бы одно неравенство строгое.

Задача Парето-оптимизации будет выглядеть следующим образом:

$$\max \left\{ \begin{array}{l} \Pi(Q, \delta) = \left(a - bQ - c^{\text{оп}} - \frac{c^K}{\lambda(Q, \delta)} - d \right) Q - F \\ CS(Q) = \frac{b}{2} Q^2 \\ \Lambda(Q, \delta) = \lambda(Q, \delta) = \frac{365}{T_0^{\text{баз}} (1 - \alpha \delta) + \beta^{\text{баз}} (1 - \gamma \delta) \left(\frac{Q}{C} \right)^v} \end{array} \right.$$

при ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q \leq C \\ 0 \leq \delta \leq 1 \\ t(Q, \delta) = a - bQ - c^{\text{оп}} - \frac{c^K}{\lambda(Q, \delta)} \geq d \end{array} \right. ,$$

где $c^{\text{оп}}$ — переменные затраты оператора;

c^K — годовые затраты на содержание единицы парка;

α — коэффициент снижения T_0 от цифрового двойника;

γ — коэффициент снижения β от цифрового двойника;

d — переменные затраты владельца инфраструктуры на единицу перевозки.

На рис. 3 изображены Парето-фронты, то есть множества всех таких комбинаций (Q, δ) , для которых нельзя улучшить ни один из трех критериев, не ухудшив хотя бы один. В зависимости от уровня цифровизации в данном случае прибыль владельца инфраструктуры и потребительский излишек повышаются за счет внедрения системы цифрового двойника.

На рис. 4 показана зависимость времени оборота от загрузки инфраструктуры.

Заключение

В настоящее время ситуация на железнодорожном транспорте характеризуется высоким оборотом вагона. Традиционные подходы к тарифному регулированию, ориентированные преимущественно на максимизацию прибыли владельца инфраструктуры, не учитывают выгоды операторов и стейкхолдеров, что приводит к снижению эффективности. Для рассмотрения

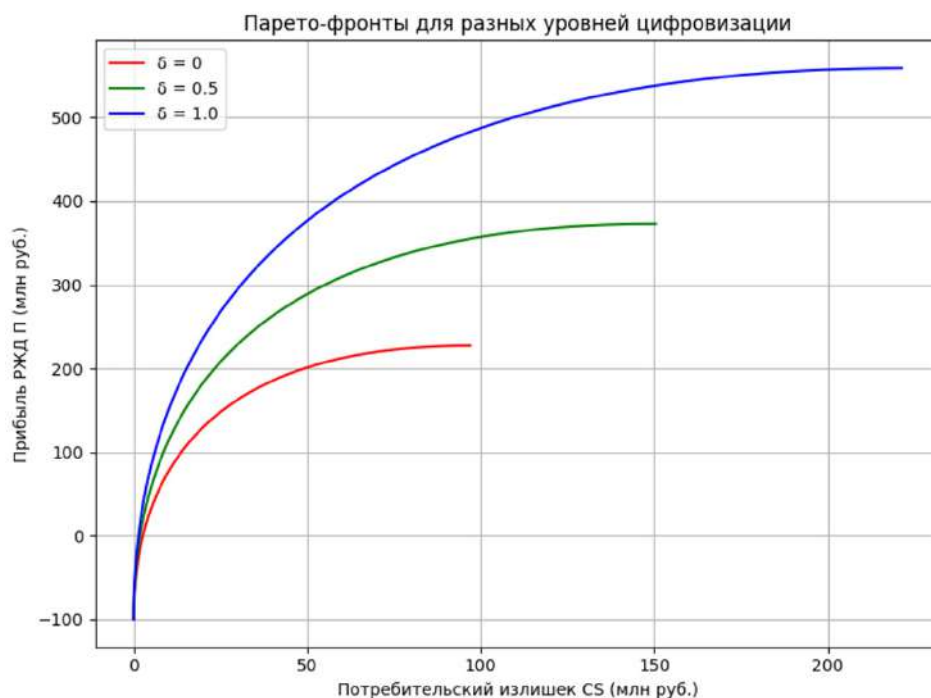


Рис. 3. Парето-фронты для разных уровней цифровизации

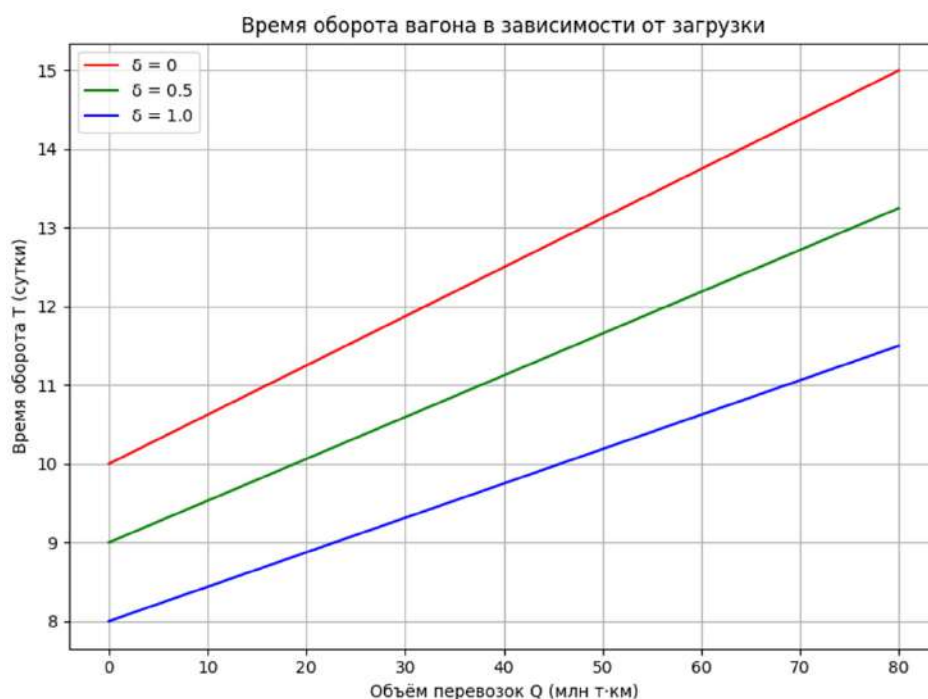


Рис. 4. График зависимости времени оборота вагона от загрузки инфраструктуры

детальной работы участников перевозочного процесса была предложена теоретико-игровая модель, которая поспособствовала выявлению недостатков в текущей работе. На следующем этапе была предложена оптимизационная задача Парето, где в качестве одного из вариантов решения проблемы было предложено внедрение цифрового двойника для работы с операторскими компаниями. За счет математического обоснования было доказано, что цифровой двойник положительно влияет как на технологический срок оборота вагона, так и на пропускную способность сети.

Список источников

1. Никифорова Г. И. Исследование эксплуатации вагонного парка операторских компаний // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020. Т. 17, вып. 3. С. 282–287. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-282-287
2. Никифоров В. В., Никифорова Г. И. Цифровизация железнодорожного транспорта с участием операторских компаний // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2022. Т. 19, вып. 4. С. 736–742. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-736-742
3. Псеровская Е. Д., Жаркова А. А., Дружинина М. Г. Показатели взаимодействия ОАО «РЖД», грузоотправителей и операторских компаний // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 5–15. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_5
4. Положение об основах правового регулирования деятельности операторов железнодорожного подвижного состава и их взаимодействия с перевозчиками от 25.07.2013 № 626. URL: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/3050507/> (дата обращения: 12.07.2026)
5. Валентинов К. О. Анализ методов управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте //

Наука, техника и образование. 2017. № 9 (39). С. 38–40. EDN ZPDRSB

6. Зубков В. Н., Черняев А. Г., Чеботарева Е. А. Совершенствование организации и управления перевозками на припортовых железных дорогах // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011. № 2. С. 33–39. EDN XCVYYF

7. Осьминина И. И. Автоматизированная система расчета плана формирования поездов // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом: сборник научных трудов. СПб.: ПГУПС, 2002

8. Организация вагонопотоков. Развитие теории расчета, технические решения / А.Т. Осьминин [и др.]. Самара, 1998. 216 с.

9. Куценко Н. Н., Елисеев С. Ю., Бородин А. Ф. Совершенствование организации вагонопотоков // Ж.-д. транспорт. Серия «Организация движения и пассажирские перевозки». ЭИ ЦНИИТЭИ, 1998. Вып. 3. С. 1–33.

10. Рыбин П. К., Максимов К. И. Проблемы и перспективы взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в современных условиях // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом: сборник научных трудов. СПб.: ПГУПС, 2007. С. 30–40. EDN TDSYCD

11. Бурков В. Н., Новиков Д. А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999. 128 с.

Дата поступления: 15.05.2026

Решение о публикации: 21.07.2026

Контактная информация:

АСКЕНДЕРОВА Дарья Сергеевна — аспирант;
dashylkalom135@yandex.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — доктор техн. наук, зав. кафедрой «Логистика и коммерческая работа»; novichikhin@pgups.ru

A Game-Theoretic Model of Stakeholders in the Transportation Process

D. S. Askenderova, A. V. Novichikhin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Askenderova D. S., Novichikhin A. V. A Game-Theoretic Model of Stakeholders in the Transportation Process // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 668–680. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-668-680 (In Russian)

Abstract

Objective: to optimize the operation of operator companies, stakeholders, and infrastructure owners. **Methods:** the study is based on methods of active systems theory (“center-active elements”), game theory (Nash equilibrium), microeconomics, and multi-criteria optimization. **Results:** the types of operator companies have been examined, their characteristics have been presented, an analysis has been carried out of the works of predecessors who conducted research into the development of methods for organizing wagon flows in railway transport, the regulatory documents that govern the operation of operator companies and their interaction with participants in the transportation process have been reviewed, and illustrations in the form of an algorithm for organizing the work of operator companies have been presented. The shortcomings of the existing organization of operator company operations have been identified. Using game-theoretic models, the shortcomings of the traditional wagon distribution system have been demonstrated. A three-criterion optimization model has been constructed, and it has been established that

the introduction of a digital twin expands the Pareto frontier, making it possible to improve the criteria. **Practical significance:** the model serves as a methodological basis for decision-making by infrastructure owners. The proposed approach makes it possible to balance the interests of market participants under conditions of limited throughput and other resource constraints. In the future, it is necessary to continue researching the possibility of implementing a digital twin on a separate test site. Develop a concept for a digital twin to ensure the availability of rolling stock, with the aim of increasing throughput and optimizing the organization of work for process participants, including stakeholders, operator companies, and infrastructure owners. Examine in detail the operation of the digital twin system, its structure, technical characteristics, and technological capabilities. Analyze how it is possible to implement a digital twin in automated systems for operating railway stations and test tracks.

Keywords: operator company, railway hub, game-theoretic model, transportation process management, optimization problem

References

1. Nikiforova G. I. Issledovanie ekspluatatsii vagonnogo parka operatorskih kompanij [Study of the Operation of the Fleet of Railcars by Operating Companies], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg State Transport University], 2020, vol. 17, no. 3, pp. 282–287. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-282-287 (In Russian)
2. Nikiforov V. V., Nikiforova G. I. Cifrovizatsiya zheleznodorozhnogo transporta s uchastiem operatorskih kompanij [Digitalization of Railway Transport with the Participation of Operating Companies], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg State Transport University], 2022, vol. 19, no. 4, pp. 736–742. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-736-742 (In Russian)
3. Pserovskaya E. D., Zharkova A. A., Druzhinina M. G. Pokazateli vzaimodejstviya Otkrytoe akcionernoe obshchestvo “Rossijskie zheleznye dorogi”, gruzootpravitelej i operatorskih kompanij [Performance Indicators of Interaction between the JSC Russian Railways, Shippers and Operating Companies], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2022, no. 2 (61), pp. 5–15. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_61_5 (In Russian)
4. Ob osnovah pravovogo regulirovaniya deyatelnosti operatorov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i ih vzaimodejstviya s perevozchikami [On the Fundamentals of Legal Regulation of the Activities of Railway Rolling Stock Operators and Their Interaction with Carriers], Regulation, dated July 25, 2013, no. 626. URL: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/3050507/> (accessed: July 12, 2026), (In Russian)
5. Valentinov K. O. Analiz metodov upravleniya vagonopotokami na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of Methods for Managing Railcar Flows in Railway Transport], *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, Technology and Education], 2017, no. 9 (39), pp. 38–40. EDN: ZPDRSB (In Russian)
6. Zubkov V. N., Chernyaev A. G., Chebotareva E. A. Sovershenstvovanie organizatsii i upravleniya perevozkami na priportovyh zheleznyh dorogah [Improving the Organization and Management of Transportation on Port Railways], *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2011, no. 2, pp. 33–39. EDN: XCVYYF, (In Russian)
7. Osmirina I. I. Avtomatizirovannaya sistema rascheta plana formirovaniya poezdov [Automated System for Calculating the Train Formation Plan], in: Aktualnye problemy upravleniya perevozochnym processom [Current Problems of Transportation Process Management]: Collection of Scientific Papers, St. Petersburg: Saint Petersburg State Transport University (PGUPS), 2002 (In Russian)
8. Osmirina A. T., et al. Organizatsiya vagonopoto-
kov. Razvitie teorii rascheta, tekhnicheskie resheniya

[Organization of Railcar Flows. Development of Calculation Theory, Technical Solutions], Samara, 1998, p. 216. (In Russian)

9. Kutsenko N. N., Eliseev S. Yu., Borodin A. F. Sovershenstvovanie organizacii vagonopotokov [Improving the Organization of Railcar Flows], *Zheleznodorozhnyj transport. Seriya "Organizaciya dvizheniya i passazhirskie perevozki"* [Railway Transport. Series "Traffic Management and Passenger Transportation"], *TsNITEI [Express Information of the Central Research Institute of Information and Technical and Economic Studies in Railway Engineering]*, 1998, no. 3, pp. 1–33 (In Russian)

10. Rybin P. K., Maksimov K. I. Problemy i perspektivy vzaimodejstviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v sovremennyh usloviyah [Problems and Prospects of Interaction between Railway and Sea Transport in Modern Conditions], *Aktualnye problemy upravleniya perevozochnym*

processom [Current Problems of Transportation Process Management]: collection of scientific papers, St. Petersburg: *PGUPS [St. Petersburg State Transport University]*, 2007, pp. 30–40. EDN: TDSYCD (In Russian)

11. Burkov V. N., Novikov D. A. Teoriya aktivnyh sistem: sostoyanie i perspektivy [Theory of Active Systems: State and Prospects], Moscow, Sinteg, 1999, 128 p. (In Russian)

Received: May 15, 2026

Accepted: July 21, 2026

Author's information:

Dar'ya S. ASKENDEROVA — Postgraduate Student; dashylkalom135@yandex.ru

Aleksej V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Head of the "Logistics and Commercial Work" Department; novichikhin@pgups.ru

УДК 656.072-05 + 614.862

Особенности оказания услуг помощи и сопровождения маломобильным гражданам на транспортных объектах, в том числе без предварительной заявки, в рамках решения задач по обеспечению безопасной и доступной среды

И. Р. Терехова¹, В. Н. Ушацкий², Е. А. Манько¹

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

² Служба охраны труда и промышленной безопасности Октябрьской железной дороги филиала ОАО «РЖД», Россия, 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 117

Для цитирования: Терехова И. Р., Ушацкий В. Н., Манько Е. А. Особенности оказания услуг помощи и сопровождения маломобильным гражданам на транспортных объектах, в том числе без предварительной заявки, в рамках решения задач по обеспечению безопасной и доступной среды // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 681–693. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-681-693

Аннотация

Цель: рассмотреть нормативные требования по оказанию специальными службами на транспортных объектах (железнодорожный транспорт, воздушный транспорт, метрополитен) маломобильным группам населения (МГН) услуги помощи и сопровождения. Проанализировать мировой опыт (на примере железнодорожного транспорта Великобритании). Установить необходимые условия успешного оказания данной услуги представителями транспорта, а также причины, влияющие на невозможность ее предоставления. Определить перспективы выполнения услуги оперативной ситуационной помощи без предварительной заявки (УОСП) на объектах транспорта Российской Федерации как аналогичной услуги Turn Up and Go (TUAG) на транспортных объектах Великобритании. **Методы:** исследование и анализ нормативной документации, регламентирующей оказание МГН услуг помощи и сопровождения на объектах транспорта, в рамках обеспечения безопасной доступной среды, согласно положениям Конвенции ООН о правах инвалидов, а также информации по данному вопросу, размещенной на сайтах объектов транспорта и характеризующей фактические условия ее выполнения. **Результаты:** определены необходимые требования для качественной реализации услуги помощи и сопровождения МГН на различных объектах транспорта, а также причины, не позволяющие ее предоставить. Предложены перспективные шаги по выполнению УОСП и некоторые способы повышения доступности транспортных объектов для маломобильных пассажиров. **Практическая значимость:** реализация предлагаемых решений позволит повысить доступность и безопасность вида транспорта, на котором они применяются, а также продемонстрирует высокую клиентоориентированность компании, которая их реализует.

Ключевые слова: услуга помощи и сопровождения, транспортный объект, маломобильные граждане, предварительная заявка, оперативная ситуационная помощь, качество обслуживания, повышение доступности транспортных объектов

Государственными нормативными актами РФ на основании правил международного законодательства определены требования к обеспечению соблюдения прав людей с инвалидностью (ЛСИ), в том числе беспрепятственного доступа к объектам транспорта и безопасного нахождения на них, с целью устранения отношенческих и средовых барьеров, которые мешают полному и эффективно-му участию ЛСИ в жизни общества наравне с другими. Подчеркивается важность создания условий для реализации независимого образа жизни и обеспечения самостоятельного посещения социально значимых объектов либо получения услуг без посторонней помощи [1–3]. Однако на практике это не всегда оказывается возможным, тогда ЛСИ и другим маломобильным гражданам (МГН) предоставляются различные виды сервиса помощников и посредников для облегчения архитектурной и информационной доступности зданий и других объектов, открытых для населения, что не противоречит принципу разумного приспособления, отраженному в [1].

В сфере транспорта, являющегося объектом повышенной опасности, создаются специальные службы, оказывающие необходимую ситуационную помощь ЛСИ по предварительной заявке (поданной за 24–48 часов до предстоящей поездки или прибытия в пункт назначения) либо непосредственно после личного обращения по месту запроса. Например, услуга Turn Up and Go (TUAG) на железнодорожных станциях и объектах метрополитена Великобритании, запрашиваемая в период менее чем за 2 часа до совершения поездки [4–7].

При этом необходимо учесть, что в случае отсутствия персонала на выбранном пункте или его занятости с другими пассажирами получение услуги TUAG может быть затруднено или вовсе невозможно. О данном факте обра-

щающийся пассажир узнает непосредственно в момент прибытия на станцию, что заведомо создает риски менее безопасного и комфортного нахождения на транспортных объектах. Ситуация усугубляется, если рассматриваемое место назначения является физически и/или информационно недоступным либо условно доступным для попытки его самостоятельного использования. В связи с этим рекомендуется до планируемого посещения станции самостоятельно получить актуальные сведения о возможности TUAG, ознакомившись с информацией через интернет (портал, приложение) либо позвонив по справочному телефону [7].

Петербургский метрополитен также предусматривает срочный запрос услуги сопровождения через официальный сайт не менее чем за 30 минут до требуемого времени оказания помощи [8]. Фактически МГН без постороннего содействия службы сопровождения не смогут попасть на платформы метро Санкт-Петербурга ввиду архитектурных особенностей их расположения и отсутствия свободного доступа к ним в виде лифтов. Шесть из 75 станций оборудованы лифтами, доступ к которым тем не менее осуществляется только при обращении к сотруднику служб помощи (вероятно, для обеспечения вопросов травмобезопасности и предотвращения использования их не маломобильными пассажирами).

Рассмотрим возможность оказания услуги оперативной ситуационной помощи без предварительной заявки (УОСП), аналогичной TUAG, в РФ на различных видах транспорта (авиасообщение, железнодорожное сообщение дальнего следования, железнодорожное пригородное сообщение). При попытке организовать предоставление услуги по сопровождению в срочном порядке, без предварительного бронирования, с трудностями могут столкнуться как ЛСИ, так

и сами представители транспортных объектов (инфраструктуры и перевозчиков).

Во-первых, на некоторых объектах транспорта (например, компании «РЖД») дополнительно потребуется специальное официальное согласование причастных служб для оказания такой срочной помощи МГН линейным персоналом. Согласно [9], стандартным временем бронирования услуги сопровождения (в соответствии с реестром станций, на которых она оказывается) является:

- период за 24 часа до времени ее исполнения (будет оказана гарантированно);
- при заказе в интервале от 4 до 24 часов — пассажира предупреждают, что выполнение услуги в полном объеме не может быть гарантировано из-за поздней подачи заявки («срочно, без гарантий»);
- за 4 часа и менее до оказания услуги заявку принимают только на вокзалах по согласованию с диспетчерским центром ЦИССК ДЖВ (на поезда дальнего следования) или технологическим центром ТЦУППК (на пригородные ж/д перевозки) и соответствующим предупреждением заявителя.

На процедуру подтверждения также может уйти какое-то дополнительное время, это нужно учесть при планировании поездки.

Во-вторых, периодичность отправления поездов дальнего следования или рейсов самолетов по определенным маршрутам может составлять один раз в несколько суток. Тогда в случае несвоевременной (поздней) явки на вокзал / в аэропорт либо своевременного прибытия, но при отсутствии помощи персонала вокзала/аэропорта (ввиду отсутствия ее раннего бронирования) путешественник с большой вероятностью не успеет пройти все необходимые для пассажиров предварительные процедуры (досмотровые, сдачу багажа и т. д.) по причине своей маломобильности (невозможности

оперативно перемещаться, быстро выполнять необходимые действия) и таким образом может опоздать на поезд/самолет. Следующая поездка будет возможна, как правило, в течение нескольких ближайших суток (опять же при наличии свободных мест). Таким образом, в дальних перевозках отсутствие предварительно согласованной помощи повышает риск срыва поездки из-за ограниченного времени на прохождение формальностей.

Стоит отметить, что существуют исключения для дальних железнодорожных сообщений: между Санкт-Петербургом и Москвой курсирует несколько (20–25) пар поездов в сутки, поэтому при опоздании на один поезд у пассажира есть гипотетическая возможность приобрести/поменять билет и отправиться на следующем. Аэропорты Москвы и Санкт-Петербурга при непопадании пассажира на забронированный рейс также предоставляют шанс оперативно совершить поездку между двумя столицами (раз в 30 минут) благодаря программе «Аэрофлот Шаттл». В обоих случаях МГН могут воспользоваться следующим ближайшим рейсом при наличии свободных доступных мест на нем. Однако стоит учесть, что ввиду отсутствия предварительного бронирования УОСП на вокзале / в аэропорту может быть не оказана из-за нехватки персонала служб помощи в конкретный период времени. Тогда должна быть обеспечена физическая и информационная доступность всех структурно-функциональных зон вокзала/аэропорта, которые маломобильные граждане могут использовать самостоятельно.

Как минимум на вокзале зона «выход на платформу — проход к поезду» должна иметь широкий проход без порогов, а также обозначенную границу опасной зоны у края платформы; в аэропорту зона «выход на посадку (гейт)» должна осуществляться через телетрап.

Таким образом, для реализации успешной поездки дальнего следования без предварительного бронирования услуги сопровождения по территории вокзала/аэропорта и возможности запроса УОСП должен быть выполнен ряд некоторых условий (предпочтительно одновременно): регулярное рейсовое сообщение (несколько раз в сутки) и наличие свободных доступных мест на транспортных средствах. Как минимум предоставление самостоятельного безбарьерного доступа на поезд/борт; как максимум свободный персонал, готовый оказать сопровождение в срочном порядке.

Со сведениями о доступности каждого конкретного аэропорта (изложенными тем или иным способом, не всегда достаточно информативным) можно ознакомиться на его официальном сайте, по железнодорожным вокзалам — на странице «Карта доступности вокзалов» портала компании «РЖД» [4]. Однако нередко приведенные данные не позволяют определить возможность самостоятельного пребывания на конкретном объекте, потому что носят неоднородный и противоречивый характер (например, иллюстрация не соответствует описательной части). Поэтому для уточнения тех или иных вопросов есть возможность воспользоваться контактами справочных служб (приложение, почта, телефон).

В-третьих, в случае воздушного сообщения, если пассажир прибыл на аэровокзал без опозданий с уже купленным билетом (необходимый критерий предварительности времени покупки определяется авиакомпаниями), но услуга сопровождения забронирована не была, возможность оказания УОСП будет реализована в случае наличия свободного персонала в требуемый момент времени. При явке в аэропорт на предстоящий рейс без заблаговременно приобретенного билета следует помнить, что запрос УОСП может быть в целом нецелесообразен ввиду

того, что воздушная гавань или само воздушное судно не готовы принять пассажира из числа МГН, поскольку объекты транспорта не будут укомплектованы необходимыми техническими устройствами и вспомогательными средствами. Следовательно, существует риск того, что поездка может не состояться.

Петербургский аэропорт Пулково, например, предлагает МГН прибыть на регистрацию заранее, не менее чем за 90 минут до времени ее окончания. Причем услугу оказания помощи МГН должны бронировать напрямую у авиакомпаний за 48 часов до вылета. Далее заявки от авиакомпаний передаются в службу сопровождения маломобильных пассажиров аэропорта, где происходит планирование ресурсов службы.

В случае обращения за помощью непосредственно в аэропорту без предварительных запросов через авиакомпанию (фактически запрос УОСП) перечень стандартно предоставляемых сервисных услуг для МГН может быть значительно ограничен ввиду отсутствия достаточного времени на эксплуатационную подготовку и реализацию некоторых организационно-технических мероприятий (например, предоставление амбулифта для посадки в самолет) или отсутствия в данный момент дополнительного персонала, способного оказать сопровождение [5]. Также при предварительном бронировании у авиакомпании есть возможность учесть всю предоставленную персональную информацию о маломобильном пассажире и успеть обеспечить максимальный комфорт непосредственно в полете. В случае поздней покупки билета или опоздания на забронированный рейс (подготовленный борт) на альтернативном рейсе (другом транспортном судне соответственно) могут быть не обеспечены определенные условия, в том числе наличие вспомогательных средств, например

удерживающих устройств (плечевых ремней) для дополнительной фиксации спины при нахождении на пассажирском кресле.

Так, компания «Аэрофлот» рекомендует прибывать в аэропорт не менее чем за 2 часа до времени вылета, при этом в случае отсутствия заказанной услуги оказания помощи (или в случае поздней заявки, запроса УОСП) гарантировать ее не может. Также отмечается, что техническая возможность предоставления бортового кресла-коляски для передвижения ЛСИ по воздушному судну (при полете личная коляска ЛСИ сдается в багаж) имеется на всех рейсах компании и не требует предварительного бронирования. Однако в случае необходимости обеспечения пассажира удерживающим устройством запрос на его наличие должен быть сделан не позднее чем за 1,5 суток до времени вылета рейса по расписанию. При потребности провоза в медицинских целях кислородного баллона с газообразным кислородом заявка должна быть подана не позднее чем за 3 суток до времени поездки, то есть условия являются еще более строгими. В случае нарушения сроков бронирования компания может отказать пассажиру в перевозке [6].

Рассмотрим специфику организации помощи МГН и перспективы реализации оказания УОСП в железнодорожном пригородном сообщении на примере Северо-Западной пригородной пассажирской компании (АО «СЗППК», компания-перевозчик). Ответственные работники компании-перевозчика смогут оказать помощь только на станциях / остановочных пунктах (всего 11), оборудованных турникетными линейками балансовой принадлежности АО «СЗППК». На информационных стойках этих объектов размещена информация о возможности вызова дежурного персонала, оказывающего ситуационную по-

мощь, с указанием режима его работы и контактных данных для оперативной связи [10]. Как и в случае железнодорожного сообщения дальнего следования, маломобильным пассажирам необходимо оформить предварительную заявку через центр содействия мобильности ОАО «РЖД» (не менее чем за 24 часа до поездки) [4, 11]. Помощь при посадке/высадке представителями перевозчика (например, помощником машиниста) осуществляется совместно с сотрудниками инфраструктурного объекта (станции / остановочного пункта) при наличии вспомогательных средств (специального оборудования). В случае обращения напрямую к персоналу перевозчика в процессе поездки УОСП оказывается силами сотрудников либо с привлечением других пассажиров, если это не противоречит требованиям безопасности [10].

Основанием для отказа от предоставления услуг помощи и сопровождения МГН будут служить следующие причины [10, 11].

1. Субъективные (ответственность пассажиров):

- при нарушении ими общественного порядка;
- несогласии подтверждать наличие инвалидности соответствующим документом (например, в случае отсутствия явных внешних признаков — так называемая скрытая, невидимая инвалидность);
- неправильно оформленная заявка с недостаточным количеством требуемых сведений, в том числе для обратной связи.

2. Объективные (ответственность персонала объектов транспорта):

- при несоответствии инфраструктуры (в [10] не представлены какие бы то ни было критерии несоответствия);
- при отсутствии в данный период времени сервисного персонала.

При совпадении времени предоставления услуги по нескольким обращениям (заявкам) первыми будут выполнены те, которые поступили своевременно (УОСП в данной ситуации не имеет приоритета) [11].

Иначе говоря, по объективным причинам, согласно [10, 11], работники транспортных объектов могут отказать маломобильному пассажиру в сопровождении и помощи по посадке и высадке из вагона в случае отсутствия вспомогательных средств (специального оборудования) либо соответствующего персонала, в том числе и при запросе УОСП. Тогда МГН потребуется действовать исходя из текущих условий каждой конкретной ситуации, например, просить помощи у других пассажиров либо путешествовать со своим сопровождающим, который сможет оказать любую ситуационную помощь на всем пути следования вне зависимости от внешних обстоятельств. Необходимо отметить, что сотрудниками АО «СЗППК» не предусмотрено оказание содействия в переносе багажа пассажира, что при его наличии делает самостоятельное путешествие более затруднительным и менее безопасным [10]. Тогда как для поездов дальнего следования установлены следующие правила по бесплатному перемещению личных вещей: для пользователей вагонов люкс и СВ — не более 50 кг (не более трех мест ручной клади); для МГН из числа пассажиров купейных, плацкартных и общих вагонов — не более 36 кг (не более двух мест ручной клади соответственно) [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что согласно приведенным требованиям локальных правил оказание ситуационной помощи имеет более высокие шансы на успешную реализацию в случае предварительной заявки от пассажира, поступившей заблаговременно (за 24 часа до поездки). Связано это с необ-

ходимостью подготовки требуемого технического оборудования (например, подъемных платформ и др.), соблюдения утвержденного графика движения поездов и планирования режима работы персонала. Невозможность осуществления УОСП по сопровождению ЛСИ, как правило, связана также с небольшим штатом сотрудников служб, оказывающих помощь МГН (особенно в пиковые часы пассажиропотоков на крупных транспортных объектах или маленьких станциях, где может не быть как достаточного числа квалифицированного персонала, так и требуемых вспомогательных устройств). Необходимо вести реестр поступающих заявок по запросу помощи и сопровождения МГН и проводить дальнейший аудит их выполнения с учетом обратной связи от пассажиров с целью оценки действий персонала и определения дальнейших мер по повышению качества предоставляемого сервиса.

Например, Управление по железным и автомобильным дорогам (Office of Rail and Road, ORR) Великобритании предоставляет в открытом доступе аналитические отчеты по различным аспектам работы транспортной отрасли, в том числе по теме удовлетворенности пассажиров качеством обслуживания на ж/д транспорте. Для всех операторов транспорта (компаний-перевозчиков) действует общее правило, содержащее требования рассмотрения и принятия решений по поступившим жалобам на некачественный сервис оказываемой МГН ситуационной помощи (в рамках национальной программы Passenger Assist), вплоть до выплаты компенсаций. Например, когда услуга была забронирована, но не предоставлена (в 2025 году 11 % пассажиров сообщили, что не получили никакой забронированной ими помощи); предоставлена с опозданием; обслуживающий персонал имеет низкую квалификацию и знания и др.

ORR на основании данных ежегодного мониторинга обязует каждую компанию-перевозчика разрабатывать и в дальнейшем реализовывать планы мероприятий по повышению уровня оказываемых услуг, в том числе по вопросам обеспечения инклюзии. Помимо необходимости соблюдения норм действующего законодательства (например, [1]), процесс конкурентирования компаний-перевозчиков стимулирует их поддерживать приемлемый уровень сервиса обслуживания пассажиров, в том числе благодаря развитию TUAG. В среднем за последние семь лет процент удовлетворенности пассажиров по всем перевозчикам составляет от 85 до 90 %. При стабильно низких показателях качества работы того или иного оператора («низкая надежность предоставляемой помощи») существует риск потери лицензии на осуществление его деятельности [12].

Стоит отметить, что основными способами решения задачи по обеспечению комфортности поездки в пригородной зоне, как и в случае авиа- и ж/д сообщения дальнего следования, необходимо предусматривать общую максимальную архитектурную и информационную доступность объектов транспортной инфраструктуры для возможности самостоятельного использования МГН [1–3]. Рассмотрим некоторые конструктивные особенности пригородной железнодорожной пассажирской инфраструктуры и способы их адаптации под нужды МГН.

В случае применения низких ж/д платформ (200 мм от уровня верха головок рельсов) требуется приспособить их для использования подъемников (передвижных или стационарных) для осуществления высадки/посадки МГН на креслах-колясках. При проведении ремонтных работ (адаптация/приспособление, модернизация, реконструкция, капитальный ремонт) на действующих станциях с небольшим пасса-

жиропотоком (1000 и менее человек в сутки в среднем в год) разрешается не реализовывать мероприятия по обеспечению их физической доступности (не устанавливать подъемники), если в пределах 50 км на том же ж/д участке есть станция, полностью обеспечивающая доступность для ЛСИ (СП 59.13330.2020). Во избежание конфликтных ситуаций и для грамотного планирования своего путешествия маломобильные пассажиры должны быть заблаговременно уведомлены об этом персоналом перевозчика.

Согласно требованиям правил National Rail Conditions of Travel и британской программы Passenger Assist, если на запрашиваемой станции отсутствуют техническая (например, пандус, платформа) или организационная (подготовленный персонал) возможность оказания помощи маломобильному пассажиру, а также в случае ремонтных работ или нештатных ситуаций, компания-перевозчик обязана организовать альтернативный способ доставки путешественника за свой счет, в том числе поездку на такси, до ближайшей доступной для МГН станции, на которой может быть оказан качественный сервис по посадке в поезд [12].

Высокие платформы (1100 мм от уровня верха головок рельсов), несмотря на обеспечение более удобного доступа для пассажиров в подвижной состав (из-за небольшого перепада высот между ними и подвижным составом при их использовании), имеют ряд эксплуатационных недостатков:

- являются менее безопасными, так как существует риск падения пассажиров (особенно МГН) в пространство между платформой и вагоном и получения ими значительных травм;
- сложны в эксплуатации с точки зрения обеспечения грузового движения (в том числе при провозе мимо них грузов нестандартных

параметров), а также осуществления путевых ремонтных работ и использования крупноразмерной техники вблизи них в связи с наличием ограничений по боковому габариту приближения строений;

- являются более дорогостоящими при строительстве и текущем содержании, в том числе в связи с сооружением опор, необходимостью обустройства пандусов и сходов.

В настоящее время электропоезда категории «Стандарт», «Ласточка», «Финист» обеспечены пандусами в головных вагонах, которые персонал перевозчика (например, помощник машиниста) поможет использовать МГН для комфортной посадки/высадки в подвижной состав и из него. Следовательно, маломобильным пассажирам необходимо садиться в первый по направлению движения вагон таких поездов для соблюдения требований безопасности, обеспечения нормативного режима труда и отдыха персонала, а также во избежание возможных задержек в установленном графике движения поездов благодаря организованному ускоренному пассажирообмену [10]. По результатам экспертного опроса работников локомотивных бригад установлено, что несоблюдение пассажирами из числа МГН рекомендации по посадке в головной вагон увеличивает время оказания помощи и может вызывать негативную оценку сервиса.

В качестве превентивных мер для минимизации потенциальных конфликтных ситуаций предлагается дополнительно акцентировать внимание маломобильных пассажиров на необходимости посадки в первый вагон, в котором предусмотрены вспомогательные устройства для безопасного доступного входа. Оповещение может осуществляться путем предоставления визуальной информации (сайт, плакаты, стенды, указатели и вывески на станциях от-

правления), а также при помощи повторяющихся аудиосообщений.

С учетом вышесказанного и принимая во внимание тот факт, что доля низких платформ на сети ОАО «РЖД» значительно превышает долю высоких, можно сделать вывод, что повышению уровня доступности железнодорожного пригородного сообщения могло бы поспособствовать введение в эксплуатацию низкопольных электропоездов для возможности беспрепятственного доступа МГН [13–15]. Однако в РФ до сих пор не налажен их массовый выпуск ввиду поиска оптимальных решений по переустройству самой конструкции подвижного состава стандартных модификаций (с высоким полом) с учетом требований обеспечения технических и эксплуатационных характеристик, в том числе по работе тягового электропривода и безопасной эксплуатации пассажирами. Также потенциальную сложность может представлять необходимость дальнейшего ремонта инновационного подвижного состава в связи с его конструктивными особенностями — при производстве планового технического обслуживания или устранении оперативных неисправностей в аварийных случаях. При реализации таких работ потребуются соблюдать повышенные требования безопасности к электротехническим и высотным работам. Также в связи с изменением конструкции подвижного состава возникнет необходимость переоснащения ремонтных депо для обеспечения качественных сервисных услуг с учетом соблюдения установленных сроков.

Выводы

1. Проведенный анализ показал, что оказание услуги помощи и сопровождения МГН на транспортных объектах наиболее эффективно при наличии предварительной заявки, поскольку это позволяет заблаговременно

подготовить персонал, технические средства и маршруты перемещения пассажира. При отсутствии бронирования возможность предоставления помощи МГН сохраняется не всегда и в значительной степени зависит от наличия свободного персонала, уровня физической и информационной доступности объекта, а также от особенностей конкретного вида транспорта. Сбор и анализ обратной связи от пассажиров по удовлетворенности сервисом оказания услуг помощи и сопровождения (анкетирование в той или иной форме) позволит выявить проблемные зоны и предложить мероприятия по их профилактике на постоянной основе.

2. Сравнение условий на авиационном, дальнем и пригородном железнодорожном сообщении выявило, что наиболее уязвимыми с точки зрения УОСП являются те перевозки, где требуется выполнение регламентированных процедур в ограниченные сроки и где сбой в сопровождении может привести к срыву поездки и/или установленного расписания движения. Рекомендуется более четко информировать пассажиров о сроках, условиях и ограничениях предоставления услуги помощи и сопровождения.

3. Наличие услуги оперативной ситуационной помощи типа TUAG (УОСП) повышает гибкость планирования поездки и снижает зависимость пассажира от необходимости предварительного бронирования сервиса, а также делает путешествие более безопасным и спокойным. Перспектива получения TUAG (УОСП) повышает привлекательность вида транспорта, на котором она оказывается, и демонстрирует высокую клиентоориентированность компании, которая ее предоставляет. Оснащение транспортных объектов дополнительными вспомогательными техническими устройствами и оборудованием, обеспечи-

вающими МГН комфорт в поездке, а также увеличение штата персонала, помогающего маломобильным пассажирам, окажет содействие развитию предоставления УОСП. Это повлечет за собой рост эксплуатационных и общепроизводственных расходов транспортных компаний, но позволит усилить социальный эффект от вложений и увеличить пассажиропоток.

4. В целях реализации положений [1] необходимо продолжать создавать МГН условия для безопасного независимого образа жизни и обеспечения самостоятельного пользования объектами транспорта путем улучшения их информационной и архитектурной доступности: дополнительно разработать стандарт по единому образному полноформатному информационному наполнению (доступному для восприятия всеми категориями МГН) страниц сайтов конкретных объектов транспорта (станций, вокзалов, аэропортов и т. д.) с постоянной актуализацией данных. На основании мирового опыта продолжить разработку усовершенствованной конструкции подвижного состава (в пользу низкопольного транспорта) с возможностью его дальнейшего широкого внедрения и эксплуатации с учетом обеспечения реализации полного производственного цикла (выпуск, эксплуатация, ремонт).

Список источников

1. Конвенция ООН о правах инвалидов. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/disability.shtml?ysclid=mgkmmx5t3t715891237 (дата обращения: 26.06.2026).
2. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026): федеральный закон от 10.01.2003 № 18-ФЗ (ред. от 31.07.2025, с изм. от 16.12.2025), ст. №80.1. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/ca969f19709e21d255e7357df1

3805890e9560fc/?ysclid=mqgz5al310507843210 (дата обращения: 26.06.2026).

3. Об установлении Порядка обеспечения условий доступности аэропортов, услуг, предоставляемых в аэропортах и на воздушных судах, для пассажиров из числа инвалидов и других лиц с ограничениями жизнедеятельности: приказ Минтранса России от 31.10.2025 № 368. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_524484/ (дата обращения: 26.06.2026).

4. Центр содействия мобильности // ОАО «РЖД». URL: https://www.rzd.ru/ru/9290_ (дата обращения: 26.06.2026).

5. Маломобильным пассажирам и пассажирам пожилого возраста // Международный аэропорт Пулково (Санкт-Петербург). URL: <https://pulkovoairport.ru/passengers/prm/> (дата обращения: 26.06.2026).

6. Пассажирам с ограничением жизнедеятельности // ПАО «Аэрофлот». URL: <https://www.aeroflot.ru/ru-ru/info/disabled/> (дата обращения: 26.06.2026).

7. Passenger Assist // Help and Assistance. Association of Train Operating Companies “National Rail”. URL: <https://www.nationalrail.co.uk/help-and-assistance/passenger-assist/> (дата обращения: 26.06.2026).

8. Для маломобильных групп населения // ГУП «Петербургский метрополитен». URL: <https://metro.spb.ru/metroformgn.html> (дата обращения: 26.06.2026).

9. Об утверждении Порядка взаимодействия Центра содействия мобильности ОАО «РЖД» с участниками перевозочного процесса при обслуживании маломобильных пассажиров на железнодорожном транспорте: распоряжение ОАО «РЖД» от 25.10.2021 № 2289р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/350249587?ysclid=mqccos10yj856242721> (дата обращения: 26.06.2026).

10. Информация для маломобильных пассажиров // Северо-Западная пригородная пассажирская компания (АО «СЗППК»). URL: <https://ppk-piter.ru/>

[passenger/malomobilnye-gruppy/](https://ppk-piter.ru/passenger/malomobilnye-gruppy/) (дата обращения: 26.06.2026).

11. Об утверждении Корпоративного порядка обеспечения условий доступности для маломобильных пассажиров и пассажиров из числа инвалидов услуг по перевозке пассажиров железнодорожным транспортом: распоряжение ОАО «РЖД» от 26.08.2020 № 1827/р (ред. от 16.01.2024). URL: <https://docs.cntd.ru/document/573046902?section=text> (дата обращения: 26.06.2026).

12. Monitoring & Regulation // Rail Regulation. Protecting Rail Passengers. Passenger Assistance. “Office of Rail and Road (ORR)” non-ministerial government department. URL: <https://www.orr.gov.uk/monitoring-regulation/rail/passengers/passenger-assistance/research> (дата обращения: 26.06.2026).

13. Alstom to supply 35 electric Coradia Stream interregional trains and associated maintenance in Bulgaria for €600 million // Press releases and news. “Alstom” company. URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2025/4/alstom-supply-35-electric-coradia-stream-interregional-trains-and-associated-maintenance-bulgaria-eu600-million> (дата обращения: 26.06.2026).

14. Липа К. Асинхронная тяга в локомотивах «сделает разницу» и для ТМХ, и для экономики России // Информационное агентство ROLLINGSTOCK Agency (RSA). URL: <https://rollingstockworld.ru/lokomotivy/kirill-lipa-asinhronnaya-tyaga-v-lokomotivah-sdelat-razniczu-i-dlya-tmh-i-dlya-ekonomiki-rossii/> (дата обращения: 26.06.2026).

15. Lightweight and flexible: FLIRT // Solutions. Rolling Stock. “Stadler (Stadler Rail)” company website. URL: <https://www.stadlerrail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> (дата обращения: 26.06.2026).

Дата поступления: 29.06.2026

Решение о публикации: 06.08.2026

Контактная информация:

ТЕРЕХОВА Ильмира Рифовна — кандидат техн. наук, доцент, terekhova_pgups@mail.ru

УШАЦКИЙ Владимир Николаевич — эксперт отдела охраны труда службы охраны труда

и промышленной безопасности Октябрьской железной дороги — филиала ОАО «РЖД»; ushatsky-vladimir@yandex.ru

МАНЬКО Елизавета Андреевна — студент; elizavetamank@yandex.ru

Specifics of Providing Assistance and Support Services to People with Limited Mobility on Transport Facilities, Including without Prior Request, as Part of Solving the Problems of Ensuring a Safe and Accessible Environment

I. R. Terekhova¹, V. N. Ushatskij², E. A. Man'ko¹

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

²Occupational Health and Industrial Safety Service of the Oktyabrskaya Railway, 117 Fontanka River emb., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Terekhova I. R., Ushatskij V. N., Man'ko E. A. Specifics of Providing Assistance and Support Services to People with Limited Mobility on Transport Facilities, Including without Prior Request, as Part of Solving the Problems of Ensuring a Safe and Accessible Environment // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 681–693. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-681-693 (In Russian)*

Abstract

Objective: consider the regulatory requirements for the provision of assistance and support services to people with limited mobility by special services at transport facilities (railway transport, air transport, metro). Analyze world experience (using the example of UK railway transport). Establish the necessary conditions for the successful provision of this service by transport representatives, as well as the reasons influencing the impossibility of providing it. To determine the prospects for implementing the service of operational situational assistance without a preliminary application (OSAP) at transport facilities of the Russian Federation, as a similar service “Turn Up and Go” (TUAG) at transport facilities in the UK. **Methods:** a study and analysis of regulatory documentation governing the provision of assistance and support services to individuals with limited mobility at public transport, as part of ensuring a safe, accessible environment in accordance with the provisions of the UN Convention on the Rights of Persons with Disabilities, as well as information on this issue posted on the websites of public transport facilities and characterizing the actual conditions of its implementation. **Results:** the necessary requirements for the high-quality implementation of assistance and support services for people with limited mobility on various public transportation systems, as well as the reasons preventing their provision, are identified. Promising steps for implementing the OSAP and some ways to improve accessibility of public transportation systems for people with limited mobility are proposed. **Practical importance:** implementation of the proposed solutions will increase the attractiveness of the mode of transport on which they are used, and will also demonstrate a high level of customer focus for the company implementing them.

Keywords: assistance and support service, transport facility, people with limited mobility, advance request, prompt situational assistance, quality of service, improving accessibility of transport facilities

References

1. Konventsiya OON o pravakh invalidov [Convention on the Rights of Persons with Disabilities], United Nations. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/disability.shtml?ysclid=mgkmmx5t3t715891237 (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
2. Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossijskoj Federatsii [Railway Transport Charter of the Russian Federation] (as amended, effective from March 01, 2026), Federal Law of the Russian Federation, dated January 10, 2003, no. 18FZ (rev. July 31, 2025, with amendments dated December 16, 2025), art. no. 80.1. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/ca969f19709e21d255e7357df13805890e9560fc/?ysclid=mqgz5al310507843210 (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
3. Ob ustanovlenii Poryadka obespecheniya uslovii dostupnosti aeroportov, uslug, predostavlyaemykh v aeroportakh i na vozdushnykh sudakh, dlya passazhirov iz chisla invalidov i drugikh lits s ogranicheniyami zhiznedeyatel'nosti [On Establishing the Procedure for Ensuring Accessibility of Airports, Services Provided at Airports and on Aircraft, for Passengers with Disabilities and Other Persons with Mobility Limitations], Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation, dated October 31, 2025, no. 368. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_524484/ (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
4. Tsentr sodeistviya mobilnosti [Mobility Assistance Center], website of JSC Russian Railways. URL: <https://www.rzd.ru/ru/9290> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
5. Malomobilnym passazhiram i passazhiram pozhilogo vozrasta [For Passengers with Reduced Mobility and Elderly Passengers], website of Pulkovo International Airport (Saint Petersburg). URL: <https://pulkovoairport.ru/passengers/prm/> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
6. Passazhiram s ogranicheniem zhiznedeyatel'nosti [For Passengers with Mobility Limitations], website of PJSC Aeroflot. URL: <https://www.aeroflot.ru/ru-ru/info/disabled/> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
7. Passenger Assist, Help and Assistance, Association of Train Operating Companies "National Rail". URL: www.nationalrail.co.uk/help-and-assistance/passenger-assist/ (accessed 26 June, 2026).
8. Dlya malomobilnykh grupp naseleniya [For Passengers with Reduced Mobility], website of State Unitary Enterprise "Saint Petersburg Metro". URL: <https://metro.spb.ru/metroformgn.html> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
9. Ob utverzhdenii Poryadka vzaimodeistviya Tsentra sodeistviya mobilnosti OAO "RZD" s uchastnikami perevozoch'nogo protsessa pri obsluzhivanii malomobilnykh passazhirov na zheleznodorozhnom transporte [On Approval of the Procedure for Interaction between the Mobility Assistance Center of JSC Russian Railways and Participants in the Transportation Process when Serving Passengers with Reduced Mobility on Railway Transport], Order of JSC Russian Railways, dated October 25, 2021, no. 2289r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/350249587?ysclid=mqccos10yj856242721> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
10. Informatsiya dlya malomobilnykh passazhirov [Information for Passengers with Reduced Mobility], JSC North Western Suburban Passenger Company. URL: <https://ppk-piter.ru/passenger/malomobilnye-gruppy/> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)
11. Ob utverzhdenii Korporativnogo poryadka obespecheniya uslovij dostupnosti dlya malomobilnykh passazhirov i passazhirov iz chisla invalidov uslug po perevozke passazhirov zheleznodorozhnym transportom [On Approval of the Corporate Procedure for Ensuring Accessibility of Passenger Railway Transport Services for Passengers with Reduced Mobility and Passengers with Disabilities], Order of JSC Russian Railways, dated August 26, 2020,

no. 1827/r (rev. January 16, 2024). URL: <https://docs.cntd.ru/document/573046902?section=text> (accessed: June 26, 2026). (In Russian)

12. Monitoring & Regulation, Rail Regulation: Protecting Rail Passengers, Passenger Assistance, Office of Rail and Road (ORR), URL: www.orr.gov.uk/monitoring-regulation/rail/passengers/passenger-assistance/research (accessed 26 June, 2026).

13. Alstom to Supply 35 Electric Coradia Stream Interregional Trains and Associated Maintenance in Bulgaria for €600 Million. Press Releases and News, Alstom company. URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2025/4/alstom-supply-35-electric-coradia-stream-interregional-trains-and-associated-maintenance-bulgaria-eu600-million> (accessed: 26 June, 2026).

14. Lipa K. Asinkhronnaya tyaga v lokomotivakh “sdelat raznitsu” i dlya TMKh, i dlya ekonomiki Rossii [Asynchronous Traction in Locomotives Will “Make a Difference” for Both Transmashholding and the Russian Economy], Rolling Stock World (RSA) news agency. URL: <https://rollingstockworld.ru/lokomotivy/>

kirill-lipa-asinhronnaya-tyaga-v-lokomotivah-sdelat-razniczu-i-dlya-tmh-i-dlya-ekonomiki-rossii/ (accessed: June 26, 2026). (In Russian)

15. Lightweight and Flexible: FLIRT. Solutions: Rolling Stock, Stadler (Stadler Rail). URL: <https://www.stadlerrail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> (accessed: 26 June, 2026)

Received: June 29, 2026

Accepted: August 06, 2026

Author's information:

Il'mira R. TEREKHOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhova_pgups@mail.ru

Vladimir N. USHATSKIY — Expert of the Labor Protection Department of the Labor Protection and Industrial Safety Service of the October Railway — a branch of JSC Russian Railways;

ushatsky-vladimir@yandex.ru

Elizaveta A. MAN'KO — Student;

elizavetamank@yandex.ru

УДК 621.313.333-192

Анализ отказов тяговых электродвигателей скоростных электропоездов проектов «Ласточка» и «Финист»

А. В. Колесова¹, С. А. Гулин², С. Л. Колесов²

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

² ОП «Металлострой», ООО «ВСМ-Сервис», 196641, Санкт-Петербург, поселок Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, корп. 10, стр. 1

Для цитирования: Колесова А. В., Гулин С. А., Колесов С. Л. Анализ отказов тяговых электродвигателей скоростных электропоездов проектов «Ласточка» и «Финист» // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 694–706. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-694-706

Аннотация

Цель: выявление видов и причин отказов асинхронных тяговых двигателей, которые зафиксированы за последние несколько лет на основании данных их технического обслуживания и ремонта. **Методы:** анализ неисправностей асинхронных тяговых двигателей поездов ЭС1, ЭС2Г, ЭС104, оценка влияния неисправностей смежного тягового оборудования, которые привели к отказам асинхронных тяговых двигателей. **Результаты:** было установлено, что отказы асинхронных тяговых двигателей обусловлены как неудовлетворительным состоянием изоляции статорной обмотки, что приводило к снижению сопротивления статорной обмотки относительно корпуса тягового двигателя и к межфазному замыканию статорной обмотки тягового двигателя, так и протеканием подшипниковых токов, которые приводят к таким неисправностям, как повышенный уровень вибрации тягового двигателя. В результате исследования разработаны рекомендации по устранению выявленных неисправностей. **Практическая значимость:** результаты работы имеют значение для совершенствования проектирования, производства и ремонта силового электрооборудования электрического подвижного состава, так как затрагивают одну из основных проблем, возникающих при эксплуатации современных скоростных электропоездов, связанную с частыми систематическими отказами асинхронных тяговых двигателей.

Ключевые слова: асинхронный тяговый электродвигатель, отказ, изоляция обмотки статора, подшипниковые токи

Использование асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) на скоростном отечественном электротранспорте, как известно [1], существенно повысило качество обслуживания пассажиров за счет возрастания скоростей движения, комфорта поездки, а также позволило существенно снизить эксплуатационные расходы.

В двухсистемных поездах ЭС1 устанавливаются тяговые двигатели 1TB2216-0GB03, изготовленные компанией Siemens, а в поез-

дах ЭС2Г и более новых (ЭС2ГП, ЭС1П) — 1TB2216-0GC03, изготовленные российской компанией «СЭП Электропривод» по технологии Siemens [2, 3].

В рамках программы импортозамещения (локализации) с 2023 года на поезда ЭС1, ЭС-2Г, ЭС-1П, а также ЭС-104, ЭС-105 допускается устанавливать тяговые электродвигатели отечественного производства [4]. На вновь выпускаемых поездах могут устанавливаться АТЭД разных производителей:

1. 1TB2216-0GB03 производства Siemens AG.

2. 1TB2216-0GC03 производства «СЭП Электропривод».

3. ДАТ-330У1 производства АО «ПТФК «ЗТЭО», Набережные Челны [5].

4. ТАДЭП315-6У1 производства компании «Русэлпром-ВЭМЗ», Владимир [6].

5. А325-330/2,5-6-У1 производства АО «РЭД», Челябинск [7].

Для удобства оценки отличий в конструкторских решениях, используемых в разных двигателях, они сведены в табл. 1.

Опыт эксплуатации показывает, что даже современные асинхронные тяговые электро-двигатели подвержены отказам.

На рис. 1 показана общая статистика отказов АТЭД поездов «Ласточка», обслуживаемых компанией «ВСМ-сервис», за 2023 год, а в табл. 2 указано количество отказов за

ТАБЛИЦА 1. Отличительные особенности конструкции АТЭД

Параметры	1TB2216 – 0GB03 (ЭС-1)	1TB2216 – 0GC03 (ЭС-2Г)	ДАТ-330У1	ТАДЭП315-6У1	А325-330/2,5-6-У1
Номинальная мощность, кВт	320	330	330	330	330
Класс изоляции обмотки статора (фактический)	240		200	200	200
Число витков обмотки статора	108	120	132	132	132
Активное сопротивление обмотки статора, мОм, при 20 °С	220	270	314	304	264
Марка электротехнической стали магнитопроводов	M270-50A EN110106		2412	2412	2414
Степень защиты	IP15		IP15	IP23	IP25
Система удаления влаги из внутреннего объема	Дренажные отверстия под лобовыми частями обмотки статора		Дренажные отверстия под лобовыми частями обмотки статора	Наклон внутренних ребер корпуса, дренажные отверстия под сердечником статора	Дренажные отверстия под лобовыми частями обмотки статора
Конструкция подшипниковых щитов	Съемный задний подшипниковый щит		Съемный задний подшипниковый щит	Съемные передний и задний подшипниковые щиты	Съемный задний подшипниковый щит
Тип и расположение подшипников (П — приводная сторона, НП — не приводная)	П — 6016 (FAG, SKF) НП — NU210 (FAG, SKF)		П — BCR 6016 НП — BCR NU210	П — BCR NU216 НП — BCR 6313	П — ЕПК 116Л НП — FAG NU210
Фильтрующие элементы	Нетканые фильтры NF		Нетканые фильтры NF	Фильтрующие решетки	Фильтрующие решетки

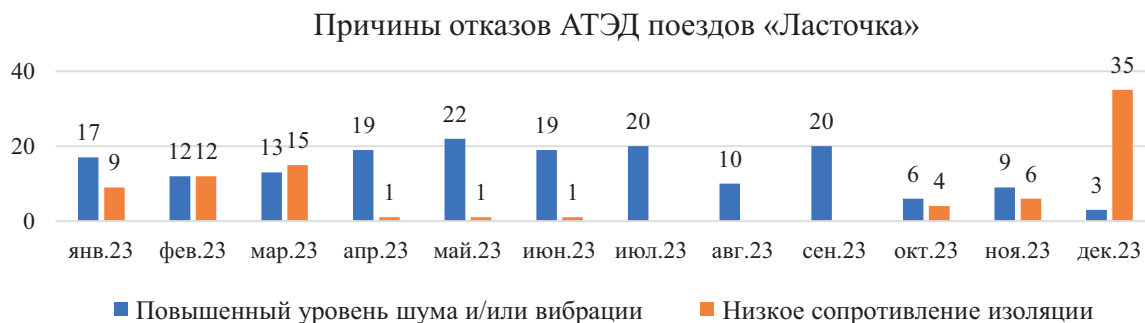


Рис. 1. Статистика отказов АТЭД электропоездов «Ласточка» за 2023 год

ТАБЛИЦА 2. Статистика отказов АТЭД проекта «Ласточка» за 2023–2025 годы

Виды отказов	Количество отказов АТЭД		
	2023 год	2024 год	2025 год
Превышение уровня вибрации подшипников	170	152	165
Низкое сопротивление изоляции обмоток статора ТЭД	84	79	73
Межвитковое замыкание в обмотке статора	15	17	14
Прочие	5	8	9
Общий итог	274	256	261

2023–2025 годы (с разбивкой по видам отказов). Общее количество АТЭД, установленное на поездах типа «Ласточка», составляет примерно 2300 шт., а ежегодный отказ составляет примерно 12 % (в том числе 3,5 % — низкое сопротивление изоляции и 7,5 % — повреждение подшипников).

На рис. 2 приведены статистические данные по отказам только импортозамещенных АТЭД, устанавливаемых на поезда «Финист», за 2025 год. В табл. 3 приведено общее количество таких отказов за 2024–2025 годы (с разбивкой по видам отказов).

Общее количество АТЭД, установленных на поездах ЭС-104 типа «Финист», составляет 376 шт., а ежегодный отказ за 2025 год составил

52 % (в том числе из-за низкого сопротивления изоляции — 36 %).

На рис. 3, 4 представлены сравнительные данные причин отказов поездов «Ласточка» и «Финист». Анализ причин отказов позволяет выявить некоторые закономерности.

У АТЭД поездов «Ласточка» наиболее частой причиной отказов является превышение уровня вибрации подшипников. Причиной этого, на наш взгляд, являются протекание подшипниковых токов и значительный пробег поездов.

Шум и вибрации подшипников в большинстве случаев возникают из-за недостаточного дросселирования коммутационных процессов ШИМ [8]. Это конструктивный недостаток используемого тягового преобразователя (ТП).



Рис. 2. Статистика отказов импортозамещенных АТЭД поездов проекта «Финист» за 2025 год

ТАБЛИЦА 3. Статистика отказов АТЭД поездов проекта «Финист» за 2024–2025 годы

Виды отказов	Количество отказов ТЭД	
	2024 год	2025 год
Превышение уровня вибрации подшипников	1	0
Низкое сопротивление изоляции обмоток статора ТЭД	126	135
Межвитковое замыкание в обмотке статора	12	0
Прочие причины	20	59
Общий итог	159	194

В электрической схеме ТП не предусмотрен моторный дроссель, что приводит к возникновению подшипниковых токов, протекание которых приводит к повреждениям поверхности колец и тел качения подшипников. С учетом замены подшипников на новые во всех случаях ремонта их повышенный шум и вибрации — наиболее частая причина отказов АТЭД.

У поездов проекта «Финист» подавляющее большинство отказов связано со снижением сопротивления изоляции обмотки статора. Причем количество отказов, связанных с низким сопротивлением изоляции обмотки статора, явно зависит от наличия снежного покрова (зима — начало весны). Снижение сопротивления изоляции вызвано, на наш взгляд, несколькими причинами.

Во-первых, в цепях АТЭД возникают волновые реакции, вызванные недостаточным дросселированием коммутационных процессов при ШИМ, что приводит к перенапряжениям в обмотках.

Во-вторых, конструкция тягового двигателя не в полной мере соответствует условиям эксплуатации. Система вентиляции допускает чрезмерное увлажнение обмотки, образование скоплений влаги. Контур вентиляции ТЭД выполнен так, что влага может проникать в корпус как со стороны забора воздуха через фильтры, так и с противоположной стороны — через выходные отверстия. Штатные сливные отверстия не позволяют полностью удалить влагу из корпуса. Накапливающееся объемное увлажнение обмоток при знакопеременных температурах

Относительное количество причин отказов АТЭД поездов
«Ласточка», %

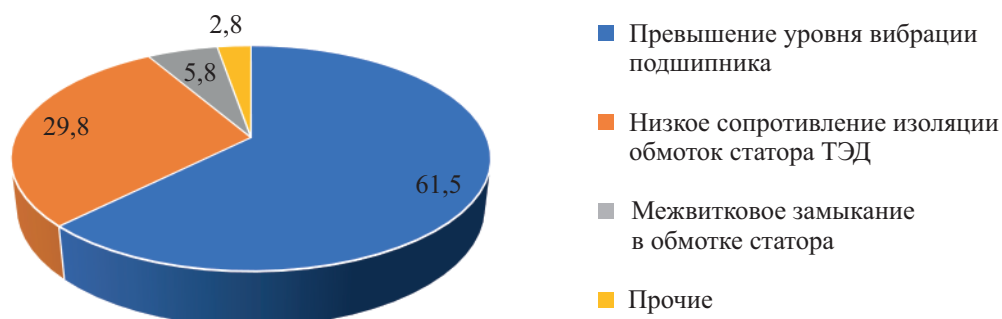


Рис. 3. Сравнение причин отказов АТЭД поездов «Ласточка»

Относительное количество причин отказов АТЭД поездов
«Финист», %

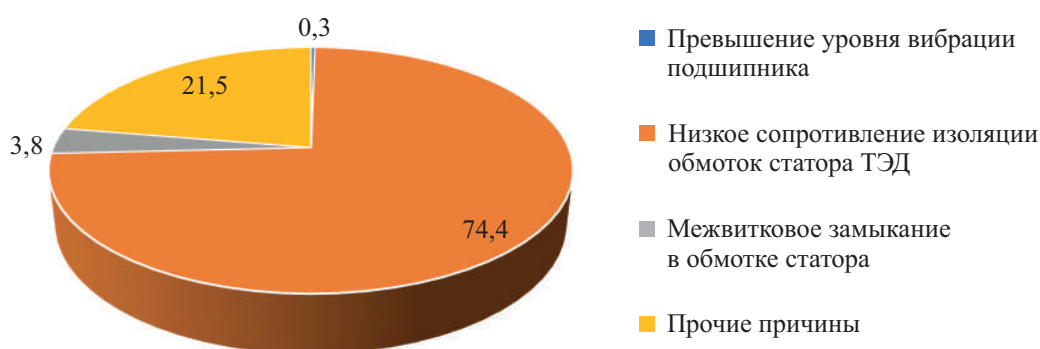


Рис. 4. Сравнение причин отказов АТЭД поездов «Финист»

окружающего воздуха приводит к механическому разрушению изоляции.

Анализ принятых конструкторских решений и опыт эксплуатации позволили выявить следующие основные особенности импортзамещенных АТЭД, которые могут приводить к отказам.

Заниженный класс нагревостойкости изоляции

В соответствии с концепцией и техническим заданием на систему управления (ЦБУ) двухсистемным поездом ЭС1 максимальная

температура обмотки статора по расчетной модели, заложенной в программное обеспечение тягового преобразователя, может достигать 240 °С (рис. 5, табл. 4) [9]. Натурные испытания АТЭД поездов ЭС1 показали соответствие реальной и расчетной температур нагрева.

Как видно из рис. 6, спустя примерно 2600 с произошло срабатывание первой ступени защиты (снижение мощности тягового двигателя). Температура обмотки статора, измеренная методом сопротивления после остановки электропоезда, составила 214 °С ($T_{\text{уставки 1-й ступени}} = 220 \text{ °С}$).

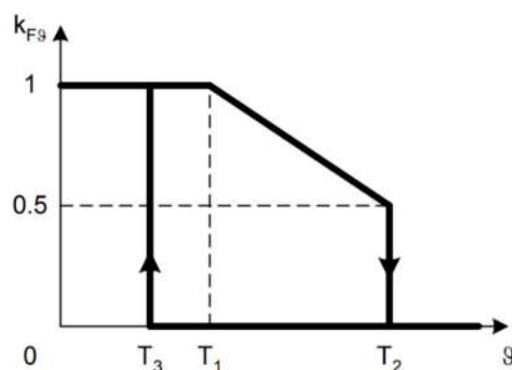


Рис. 5. Принцип температурно-зависимого восстановительного коэффициента по ограничению момента ТЭД

ТАБЛИЦА 4. Температурные ограничения тепловой модели

Показатель	T1	T2	T3
Предельная температура обмотки статора (температурная модель ТЭД) в режиме самовентиляции, °C	220	240	210
Предельная температура обмотки статора (температурная модель ТЭД) в режиме внешнего наддува, °C	255	255	210

Примечание. В режиме внешнего наддува не происходит снижения тягового усилия в зависимости от температуры, поэтому температурный предел для блокировки ТП повышен до 255 °C.

Снижение мощности АТЭД привело к стабилизации температуры обмотки тягового двигателя, поэтому срабатывание второй ступени защиты (отключение тягового преобразователя при $T_{\text{уставки 2-й ступени}} = 240$ °C) не было достигнуто. Для установления факта срабатывания второй ступени тепловой защиты понижалась ее температурная уставка. Срабатывание защиты (отключение тягового преобразователя) в этом случае происходило при температуре обмотки статора 201 °C.

Изоляция тяговых двигателей 1ТВ2216-0GB03 и 1ТВ2216-0GC03, согласно IEC 60349-2, фактически изготовлена в классе нагревостойкости, допускающем перегрев 200 °C.

Причем размеры тягового двигателя при этом выбираются такими, что в нормальном

режиме работы не достигаются предельные значения температуры, то есть имеется температурный резерв. На основании этого резерва возможны кратковременные перегрузки (рис. 7) с сохранением запланированного срока службы. Срок службы электрической изоляции АТЭД в таких условиях составляет не менее 20 лет, или 3,5 млн км пробега, в зависимости от того, что наступит раньше.

Изоляция локализованных АТЭД имеет класс нагревостойкости 200 и допускает перегрев 160 °C в соответствии с ГОСТ 8865-93. При проведении приемо-сдаточных испытаний максимальная температура изоляции, измеренная методом сопротивлений, составила 160 °C. Поскольку в системе охлаждения двигателей устанавливаются воздушные фильтры, то при

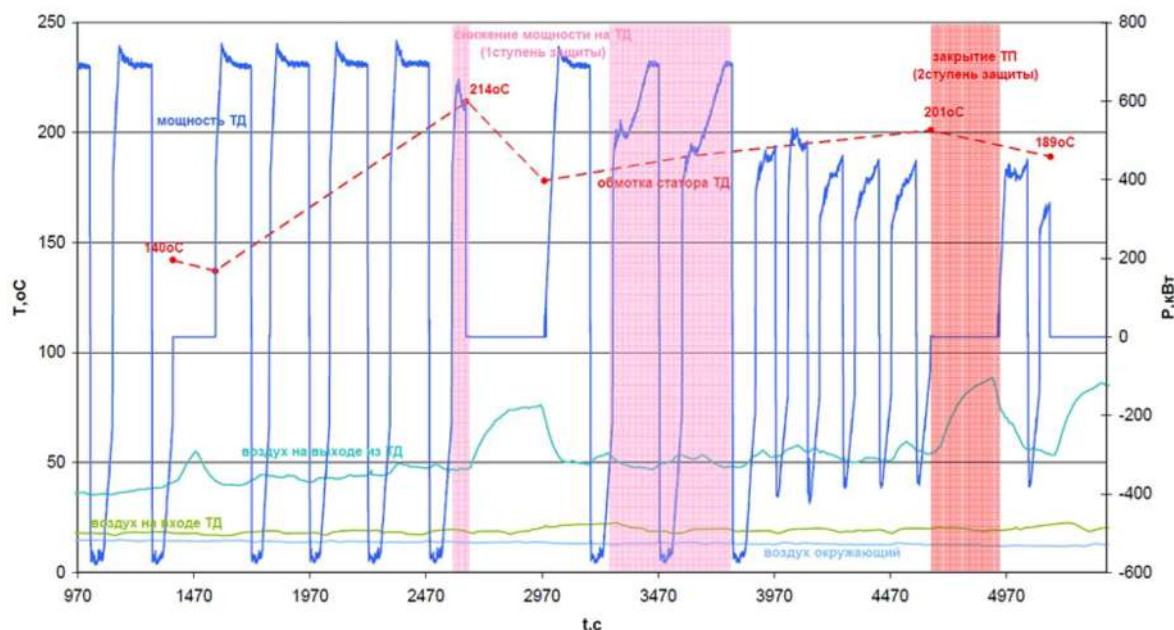


Рис. 6. Испытания тепловой защиты ТАД (по данным ВНИИЖТ)

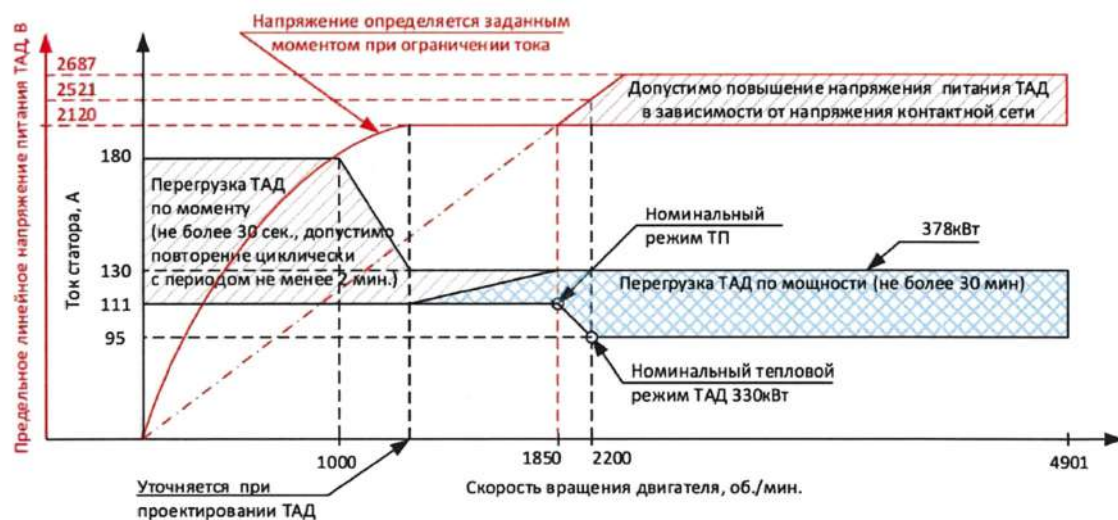


Рис. 7. Зависимость предельного тока статора от частоты вращения ротора в тяговом режиме и допустимые перегрузки

их неизбежном загрязнении температура обмотки статора будет существенно повышаться до значений, соответствующих расчетным моделям АТЭД поездов ЭС1. В таких условиях срок службы изоляции в соответствии с правилом Монтигера может уменьшиться примерно в 16 раз.

Изменение электромагнитных параметров АТЭД

Магнитопроводы статора и ротора двигателей ДАТ-330У1 и ТАДЭП315-6У1 изготавливаются из электротехнической стали 2412. В двигателях 1ТВ2216-0GB03 и 1ТВ2216-0GC03 магнитная система изготавливается из динамной

стали марки M270-50A EN110106, магнитные потери у которой ниже, чем у стали 2412. Кроме того, в АТЭД производства компании Siemens для изоляции листов пакета статора используется специальный термостойкий лак.

Наиболее близкой по магнитным свойствам к стали M270-50A EN110106 является сталь 2414, которая используется для изготовления магнитопроводов АТЭД А325-330/2,5-6-У1.

Таким образом, использование электротехнической стали с большими магнитными потерями приводит к дополнительному нагреву статора.

Увеличение числа витков обмотки статора (см. табл. 1) приводит к увеличению индуктивного сопротивления рассеяния статора x_1 и активного сопротивления статора r_1 . Увеличение активного сопротивления обмотки статора r_1 приводит к увеличению потерь в меди статора и, следовательно, к дополнительному нагреву обмотки статора. А увеличение x_1 приводит к снижению мощности при увеличении частоты питающего напряжения.

Следовательно, тяговые двигатели с увеличенным числом витков обмотки статора и измененной маркой стали (ДАТ-330У1, ТАДЭП315-6У1, А325-330/2,5-6-У1) требуют индивидуальной настройки ТП при их использовании в групповом приводе.

Использование фильтрующих элементов

Забор воздуха для охлаждения АТЭД производится из подвагонного пространства. Поэтому для защиты от попадания влаги и посторонних предметов во внутренний объем АТЭД предусмотрены фильтрующие элементы. На двигателях производства компании Siemens и на двигателе ДАТ-330У1 фильтры изготавливаются из нетканого материала, на других АТЭД в качестве фильтров устанавливаются металлические фильтрующие решетки.

На рис. 8, 9 и в табл. 5 представлены результаты исследований влияния фильтров АТЭД на тепловые режимы двигателей поездов ЭС1, проведенных ВНИИЖТ. На рисунках цветами

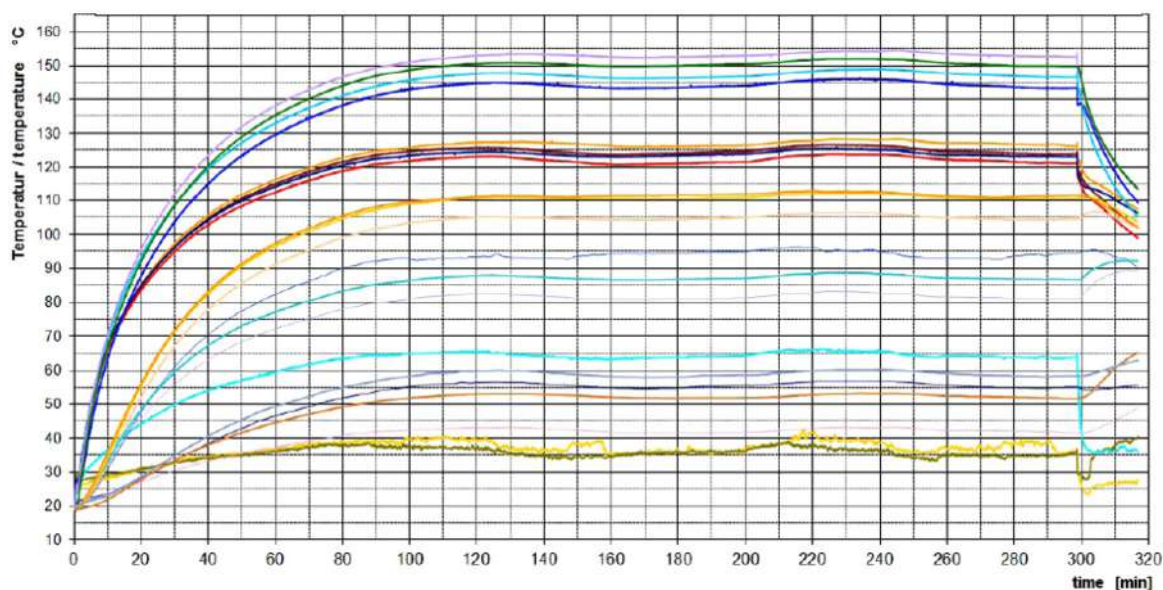


Рис. 8. Характеристика нагрева ТЭД без фильтров

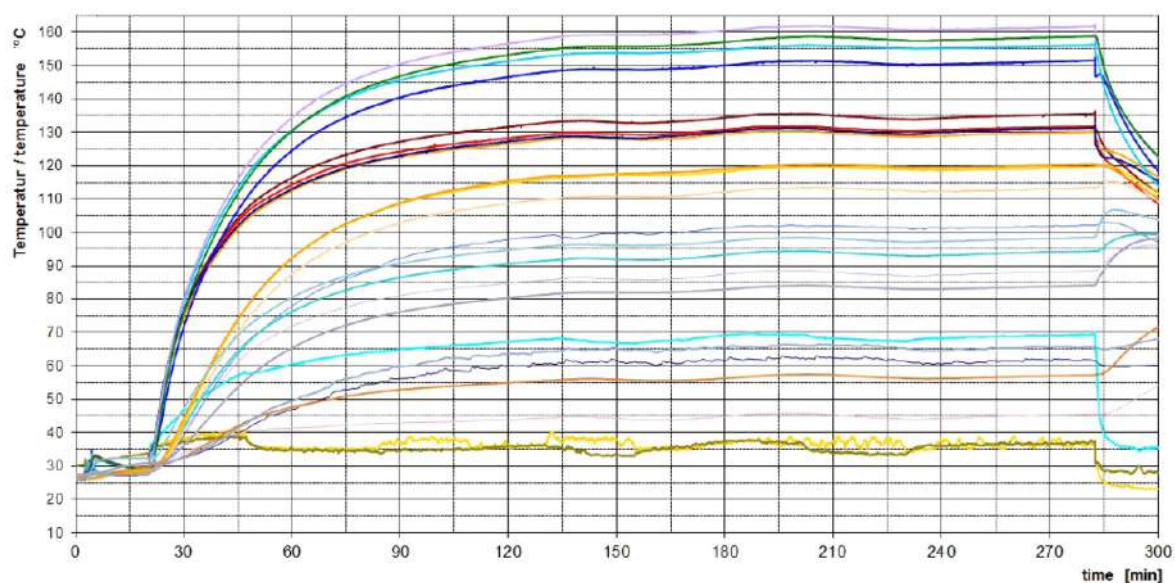


Рис. 9. Характеристика нагрева ТЭД с фильтрами

ТАБЛИЦА 5. Результаты тепловых испытаний АТЭД

Показатели	Расчет	Измерение	
		с фильтром	без фильтра
Продолжительность испытания (до стабилизации температуры), мин	240	260	290
Номинальная частота вращения, об/мин	2200	2201,6	2202,3
Номинальный момент, Нм	1433	1439	1439
Скольжение, %	0,8	0,8	0,7
Входная электрическая мощность, кВт	–	349,1	349,3
Механическая мощность на валу, кВт	330	331,7	331,9
Коэффициент полезного действия	0,95	0,95	0,95
Температура воздуха на входе, °C	–	35,8	35,6
Температура воздуха на выходе, °C	–	68,5	64,6
Среднее значение нагрева статора, °C	–	102	93

обозначены кривые нагрева различных узлов АТЭД. Максимально расположенная кривая соответствует нагреву обмотки статора.

Эксплуатация показала, что установка нетканых фильтров увеличивает температуру нагрева обмотки статора в среднем на 10 °C, а загрязнение фильтрующих элементов в про-

цессе эксплуатации приводит к дополнительному увеличению температуры обмотки статора в среднем на 10–15 °C.

Тепловые испытания позволили обосновать переход к круглогодичной работе с фильтрами во всех локациях, так как ТЭД имеет повышенный запас по тепловой мощности.

Использование в качестве фильтров металлических решеток приводит к тому, что во внутренний объем двигателя в больших количествах попадает железнодорожная пыль, а в зимнее время — снежные массы, что крайне негативно сказывается на состоянии изоляции.

Решение проблемы вентиляции АТЭД достигается переносом места забора охлаждающего воздуха, за счет чего снижается попадание пыли и снега, что реализовано в двигателях А325-330/2,5-6-У1, или использованием систем принудительной вентиляции.

Попадание во внутренний объем АТЭД снега и последующая его оттайка требуют дополнительной системы каплеудаления. Как показал опыт эксплуатации, наиболее эффективная система каплеудаления установлена в двигателях ТАДЭП315-6У1.

Особенности защиты от подшипниковых токов

Защита от подшипниковых токов реализована за счет использования токоизолированных подшипников. Наиболее перспективным направлением является установка подшипников с изолированными (керамическими) телами качения.

В АТЭД производства компании Siemens и локализованных ДАТ-330У1, А325-330/2,5-6-У1 подшипники устанавливаются по общей схеме: со стороны выходного конца вала — шариковый, с противоположного конца — роликовый. Передний подшипниковый щит несъемный, выполнен с корпусом двигателя как единая деталь. Такое расположение подшипников и конструкция переднего щита обеспечивают хорошую жесткость при опорно-рамном подвешивании АТЭД.

У двигателей ТАДЭП315-6У1 передний подшипниковый щит съемный и со стороны выходного конца вала установлен роликовый

подшипник, а с противоположной стороны — шариковый. При опорно-рамном подвешивании АТЭД такое исполнение переднего подшипникового щита и расположение подшипников не будут обеспечивать необходимую жесткость, что приведет к увеличению нагрузок на подшипники. Поэтому в данных АТЭД установлены подшипники большего габарита. Они, естественно, имеют большее полное сопротивление, следовательно, величина подшипниковых токов через них будет меньше.

В тяговых двигателях А325-330/2,5-6-У1 для защиты от подшипниковых токов со стороны выходного конца вала устанавливается заземляющее кольцо Juvtek K27. Такое техническое решение позволяет за счет шунтирования использовать обычные неизолированные подшипники. Однако использование заземляющих колец требует пересмотра концепции заземления тягового привода, так как подшипниковые токи в этом случае могут замыкаться через другие электрические контуры, например через неизолированные подшипники редукторов [8].

Выводы

Анализ отказов локализованных тяговых электродвигателей, устанавливаемых на скоростных электропоездах постоянного тока серии ЭС104, показал, что подавляющее большинство связано со снижением сопротивления изоляции статорной обмотки. Причем до 50 % установленных на подвижной состав локализованных тяговых электродвигателей отказывают ежегодно. У зарубежных тяговых электродвигателей этот показатель составляет около 12 %. Кроме того, у локализованных тяговых электродвигателей количество отказов, связанных с низким сопротивлением изоляции обмотки статора, явно зависит от наличия снежного покрова (зима — начало весны), что говорит о проблемах с влагоудалением.

Большинство отказов тяговых электродвигателей, изготовленных компанией Siemens, вызвано повышенным уровнем вибрации подшипников. Это обусловлено значительными пробегами поездов и износом подшипников.

Следует отметить, что по мере роста пробега поездов ЭС104 неизбежно будет увеличиваться и количество отказов подшипников.

Основными техническими мероприятиями, направленными на повышение надежности АТЭД, на сегодняшний день являются:

1. Пересмотр конструкции локализованно выпускаемых АТЭД с учетом устранения имеющихся недостатков в части изменения контура вентиляции, полного удаления влаги и конденсата из корпуса, выбора изоляции и электромагнитных параметров.

2. Установка моторных дросселей.

3. Разработка и внедрение устройств сушки изоляции обмоток АТЭД, в том числе на основе явления электроосмоса.

4. Применение гибридных токоизолированных подшипников.

Вследствие этого без принятия дополнительных мер по повышению надежности прогнозируется значительное количество отказов и увеличение затрат на ремонт и простой поездов.

Список источников

1. Скоростной электропоезд ЭС1 «Ласточка»: учеб. пособие / А.Ю. Слизов [и др.]; под ред. А.В. Ширяева. М.: Автограф, 2015.
2. Электропоезд ЭС2Г: учеб. пособие: в 2 ч. / А.В. Ширяев [и др.]; под ред. А.В. Ширяева. М.: Российские железные дороги, 2019.
3. Скоростной пассажирский электропоезд «Финист» (ЭС104, ЭС105) // Уральские локомо-

тивы. URL: <https://ulkm.ru/products/skorostnye-elektropoezda/es104finist/#section-advantages> (дата обращения: 15.10.2025).

4. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г. Руководство по эксплуатации. Часть 2. ЭС2Г.0.00.000.000 РЭ1.

5. Двигатель асинхронный тяговый ДАТ-330У1. Руководство по эксплуатации. ДИЖЦ.526872.001РЭ-ЛУ.

6. Двигатель асинхронный тяговый ТАДЭП315-6У1. Руководство по эксплуатации. ВИГЕ.520205.020 РЭ.

7. Электродвигатель асинхронный тяговый мощностью 330 кВт. Руководство по эксплуатации 76.00.00.000 РЭ.

8. ГОСТ IEC/TS 60034-25-2017. Межгосударственный стандарт «Машины электрические вращающиеся». Часть 25. Электрические машины переменного тока, используемые в системах силового привода. Руководство по применению.

9. Протокол приемочных испытаний электропоезда ЭС1 (Desiro RUS). Тягово-энергетические испытания. М.: ОАО «ВНИИЖТ», 2012.

10. Концепция А6Z00043547700. Спецификация требований к ЦБУ. Тип поезда ЭС1М — двухсистемный поезд. Сименс Мобильность ГмбХ, 2019.

Дата поступления: 06.07.2026

Решение о публикации: 24.07.2026

Контактная информация:

КОЛЕСОВА Анна Владимировна — старший преподаватель; kolesoff76@mail.ru

ГУЛИН Сергей Алексеевич — кандидат техн. наук, ведущий специалист; Gulin.spb@yandex.ru

КОЛЕСОВ Сергей Львович — кандидат техн. наук, доцент, ведущий специалист; kolesoff_s_l@mail.ru

Analysis of Traction Motor Failures of High-Speed Electric Trains of the “Lastochka” and “Finist” Projects

A. V. Kolesova¹, S. A. Gulin², S. L. Kolesov²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

² Separate Division “Metallostroy”, LLC “VSM-Service”, 3 doroga na Metallostroy, bldg. 10, str. 1, Metallostroy settlement, St. Petersburg, 196641, Russia

For citation: Kolesova A. V., Gulin S. A., Kolesov S. L. Analysis of Traction Motor Failures in High-Speed Electric Trains of the “Lastochka” and “Finist” Projects // Proceedings of Petersburg Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 694–706. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-694-706 (In Russian)

Abstract

Objective: since 2014, high-speed passenger trains with asynchronous traction drives have been in regular operation on Russian Railways tracks. During operation, a significant number of traction equipment failures, specifically asynchronous traction motors, have been detected. This article identifies the types and causes of asynchronous traction motor failures identified over the past several years based on maintenance and repair data. **Methods:** the study includes an analysis of asynchronous traction motor failures on ES1, ES2G, and ES104 trains and an assessment of the impact of adjacent traction equipment that led to asynchronous traction motor failures. **Results:** it was established that failures of asynchronous traction motors are caused by both poor stator winding insulation, which leads to such malfunctions as decreased stator winding resistance relative to the traction motor housing and interphase short circuits in the traction motor stator winding, and the flow of bearing currents, which lead to such malfunctions as increased traction motor vibration. The study resulted in the development of recommendations for eliminating the identified malfunctions. **Practical significance:** the results of the study are significant for improving the design, production, and repair of power electrical equipment for electric rolling stock, as they address one of the main problems arising during the operation of modern high-speed electric trains, associated with frequent systematic failures of asynchronous traction motors.

Keywords: asynchronous traction motor, failure, stator winding insulation, bearing currents

References

1. Slizov A. Yu, et al. Skorostnoj elektropoezd ES1 “Lastochka” [High-Speed Electric Train ES1 “Lastochka” (Swallow)], edited by Shiryaev A. V. Moscow, Avtograf, 2015. (In Russian)

2. Shiryaev A. V., et al. Elektropoezd ES2G: uchebnoe posobie v dvukh chastyakh [Electric Train ES2G: A Textbook in 2 parts], edited by Shiryaev A. V. Moscow, Russian Railways, 2019. (In Russian)

3. Skorostnoj passazhirskij elektropoezd “Finist” (ES104, ES105) [High-Speed Passenger Electric Train “Finist” (ES104, ES105)], Uralskie lokomotivy [Ural

Locomotives]. URL: <https://ulkm.ru/products/skorostnye-elektropoezda/es104finist/#section-advantages> (accessed: October 15, 2025). (In Russian)

4. Elektropoezd s asinhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 2. ES2G.0.00.000.000 RE1 [Electric Train with Asynchronous Traction Drive of EGE Type, Series ES2G. Operation Manual. Part 2. ES2G.0.00.000.000 RE1]. (In Russian)

5. Dvigatel' asinhronnyj tyagovyj DAT-330U1. Rukovodstvo po ekspluatatsii. DIZhTs.526872.001RE-LU [Asynchronous Traction Motor DAT-330U1. Operation Manual. DIZhTs.526872.001RE-LU]. (In Russian)

6. Dvigatel' asinhronnyj tyagovyj TADEP315-6U1. Rukovodstvo po ekspluatatsii. VIGE.520205.020 RE [Asynchronous Traction Motor TADEP315-6U1. Operation Manual. VIGE.520205.020 RE]. (In Russian)
7. Elektrodvigatel' asinhronnyj tyagovyj moshchnost'yu 330 kW. Rukovodstvo po ekspluatatsii 76.00.00.000 RE [Asynchronous Traction Electric Motor, 330 kW. Operation Manual 76.00.00.000 RE]. (In Russian)
8. GOST IEC/TS 60034-25-2017. Mezhgosudarstvennyj standart. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Chast' 25. Elektricheskie mashiny peremennogo toka, ispol'zuemye v sistemah silovogo privoda. Rukovodstvo po primeneniyu [IEC/TS 60034-25:2017. Interstate Standard. Rotating Electrical Machines. Part 25. AC Machines Used in Power Drive Systems. Application Guide]. (In Russian)
9. Protokol priyomochnyh ispytaniy elektropoezda ES1 (Desiro RUS). Tyagovo-energeticheskie ispytaniya [Acceptance Test Report for Electric Train ES1 (Desiro RUS). Traction and Energy Tests]. Moscow, JSC VNIIZhT, 2012. (In Russian)
10. Kontsepsiya A6Z00043547700. Spetsifikatsiya trebovanij k TsBU. Tip poezda ES1M — dvusistemnyj poezd [Concept A6Z00043547700. Specification of Requirements for Central Control Unit. Train Type ES1M — Dual-System Train]. Siemens Mobility GmbH, 2019. (In Russian)
- Received: July 06, 2026
Accepted: July 24, 2026
- Author's information:**
Anna V. KOLESOVA — Senior Lecturer;
kolesoff76@mail.ru
Sergej A. GULIN — PhD in Engineering, Leading Specialist; gulin.spb@yandex.ru
Sergej L. KOLESOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Leading Specialist;
kolesoff_s_l@mail.ru



УДК 629.4.083+621.7.025

Очистка поверхностей от эксплуатационных загрязнений в рамках технического обслуживания подвижного состава

Е. И. Макарова, И. С. Тимофеев, Вэйцзе Ло

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

Для цитирования: Макарова Е. И., Тимофеев И. С., Ло Вэйцзе. Очистка поверхностей от эксплуатационных загрязнений в рамках технического обслуживания подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 707–716. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-707-716

Аннотация

В процессе эксплуатации детали и узлы железнодорожного подвижного состава неизбежно подвергаются загрязнению, имеющему неоднородный состав, специфические свойства и способствующему появлению коррозионных процессов, а также разрушению лакокрасочного покрытия. **Цель:** совершенствование процесса очистки поверхностей от эксплуатационных загрязнений при техническом обслуживании подвижного состава. **Методы исследования:** физико-химические, физико-механические, статистические методы анализа. **Результаты:** сформулированы предложения по совершенствованию процесса очистки поверхностей от эксплуатационных загрязнений при техническом обслуживании подвижного состава. **Практическая значимость:** показана возможность очистки поверхностей подвижного состава от эксплуатационных загрязнений новой моющей композицией, полученной на базе техногенных продуктов и имеющей высокие технические характеристики. Определены рациональные соотношения компонентов моющей композиции.

Ключевые слова: эксплуатационные загрязнения, подвижной состав, моющие средства, коррозия, техническое обслуживание, лакокрасочные покрытия, железнодорожный транспорт

Введение

Железнодорожный транспорт играет важную роль в развитии мировой экономики, обеспечивая эффективные перевозки на большие расстояния. В этой связи вопрос надежности и долговечности железнодорожного подвижного состава становится актуальным, а исследования, проводимые в данной области, имеют практическое значение.

Одним из наиболее значимых факторов, снижающих срок эксплуатации подвижного состава, является загрязнение поверхностей,

в том числе и металлических [1–3]. Загрязнения представляют собой сложную систему, состоящую из углеводородов, смол, оксидов металлов и частиц пыли.

При контакте с влагой и пылью на металлической поверхности образуется стойкая эмульсионная пленка, ограничивающая доступ кислорода и способствующая появлению микрозон повышенной влажности, в которых более интенсивно протекают процессы разрушения металла. Таким образом, нефтепродукты, смешиваясь с пылью и влагой, образуют

плотные слои загрязнений, способствующие протеканию процессов коррозии под ними [4].

В исследованиях [5] показано, что длительное воздействие загрязнений, содержащих нефтепродукты, снижает коррозионную стойкость металлических поверхностей на 40–50%. Средняя скорость коррозии под слоем таких загрязнений составляет 0,125–0,075 мм/год (табл. 1) [6, 7].

Существенно замедлить коррозионные процессы позволяют лакокрасочные покрытия, представляющие собой многослойную систему, состоящую из грунтовки, шпатлевки, промежуточного слоя (полиуретановая краска) и верхнего слоя (краска базового цвета). Наиболее серьезные повреждения лакокрасочных покрытий, связанные с ударами насекомых, песка и посторонних предметов, наблюдаются на переднем кожухе подвижного состава, в области лобового стекла, а также на боковых панелях. Состояние лакокрасочного покрытия подвижного состава зависит также от методов очистки и природы моющих средств.

Таким образом, поддержание чистоты поверхностей подвижного состава является важнейшей и актуальной задачей, способствующей коррозионной стойкости узлов и деталей, сохранению лакокрасочного покрытия, а следовательно, повышению долговечности подвижного состава.

Современные способы очистки от загрязнений

Анализ литературы [8–10] показал, что вопросу очистки поверхностей железнодорожного подвижного состава от загрязнений в разных странах уделяется повышенное внимание, а основными требованиями, предъявляемыми к моющим средствам, являются, во-первых, эффективность удаления загрязнений, во-вторых, безопасность для окружающей среды, в-третьих, безопасность для металлических поверхностей и, в-четвертых, безопасность для лакокрасочных покрытий (табл. 2).

Регулярность очистки подвижного состава от загрязнений зависит от вида состава и условий эксплуатации, что представлено на рис. 1.

В настоящее время для очистки поверхностей железнодорожного подвижного состава от эксплуатационных загрязнений применяют механические, химические, термические и комбинированные способы (табл. 2).

Моечные машины для очистки железнодорожного подвижного состава от эксплуатационных загрязнений

Существенно повысить качество очистки подвижного состава от эксплуатационных загрязнений позволяет использование моечных машин стационарных или передвижных

ТАБЛИЦА 1. Влияние загрязнений, содержащих нефтепродукты, на металлические поверхности

Анализируемый показатель	По данным исследований	
	Россия [6]	КНР [7]
Средняя скорость коррозии металлической поверхности под загрязнением, содержащим нефтепродукты, мм/год	0,125	0,075
Потеря массы металлического образца за 1000 ч испытаний, %	2,4	1,5
Средняя толщина загрязнения, мкм	150–200	100–120
Влажность под загрязнением, %	40	28

(портальные или самоходные). В зависимости от назначения различают моечные машины для очистки подвижного состава целиком и моечные машины для очистки отдельных деталей и узлов подвижного состава (струйные или погружные).

ТАБЛИЦА 2. Основные направления работ по очистке поверхностей подвижного состава от загрязнений

Сравнительный показатель	Россия	Китай	Германия	Узбекистан
Организационная система	Гибко-плановая, с сезонной адаптацией	Строго плановая, по пробегу/времени	Гибкая, по состоянию и пробегу	По необходимости, по визуальному контролю
Основной процесс	Комбинированный (автоматический + ручной)	Полностью автоматизированный	Высокоавтоматизированный с рециркуляцией воды	Преимущественно ручной
Применяемые моющие средства	Адаптированные для низких температур и сложных загрязнений	Специализированные, регламентированные ТВ/Т (например, от Beijing Lvjin), pH-нейтральные	Высокоэффективные, экологичные, биоразлагаемые (например, Diversey, Kärcher), соответствие REACH	Универсальные, доступные (например, Kärcher, местные бренды), безопасные для алюминия
Уровень автоматизации	Высокий	Очень высокий	Очень высокий	Низкий
Эффективность и скорость	Средняя	Очень высокая	Высокая	Низкая
Основной принцип	Адаптивность и функциональность	Стандартизация и масштабируемость	Экономическая и экологическая эффективность	Практическая достаточность

Вид подвижного состава		
Пассажирские вагоны [11]	Моторвагонный подвижной состав [11]	Локомотивы [12]
Очистка после каждого рейса	Очистка при каждом техническом обслуживании (ТО-3) и текущем ремонте (ТР-1, ТР-2 и ТР-3)	Регулярность очистки устанавливает собственник в зависимости от вида ТО, вида ремонта, состояния поверхности, района эксплуатации и характера загрязнений
[ГОСТ Р 54612-2011. Вагоны пассажирские локомотивной тяги и моторвагонный подвижной состав. Требования к обмывке и очистке]	[ГОСТ Р 54612-2011. Вагоны пассажирские локомотивной тяги и моторвагонный подвижной состав. Требования к обмывке и очистке]	[ГОСТ Р 58234-2018. Тяговый подвижной состав. Требования к очистке и обмывке]

Рис 1. Регулярность очистки подвижного состава от загрязнений

Метод очистки подвижного состава в моечной машине представлен на рис. 2, метод очистки деталей и узлов подвижного состава представлен на рис. 3. Скорость движения подвижного состава в моечной машине не должна превышать 1,5 км/ч.

Моющие средства для очистки электрического подвижного состава от эксплуатационных загрязнений

Для удаления эксплуатационных загрязнений с поверхностей электрического подвижного состава наиболее востребованными являются комбинированные способы очистки (механические и химические) с использованием моющих средств разной природы (табл. 3) [11, 12].

Температура отмывки поверхностей, как правило, составляет от 40 до 90 °С. Эффективность очистки зависит от природы загрязнения, концентрации моющего средства и способа очистки. При выборе моющего средства необ-

ходимо учитывать его совместимость с конкретными типами лакокрасочного покрытия подвижного состава.

Анализ литературы показал, что, несмотря на значительный прогресс, современные моющие средства имеют существенные недостатки, а следовательно, проведение исследований в данной области и разработка новых моющих композиций, способных эффективно отмыть поверхность железнодорожного подвижного состава от эксплуатационных загрязнений, являются актуальными.

Разработка эффективной моющей композиции для очистки железнодорожного подвижного состава от эксплуатационных загрязнений

В работах [2, 13, 14] была показана возможность получения эффективных моющих средств на базе процессов гелеобразования. В развитие этих работ предложена основная гипотеза, состоящая в следующем.

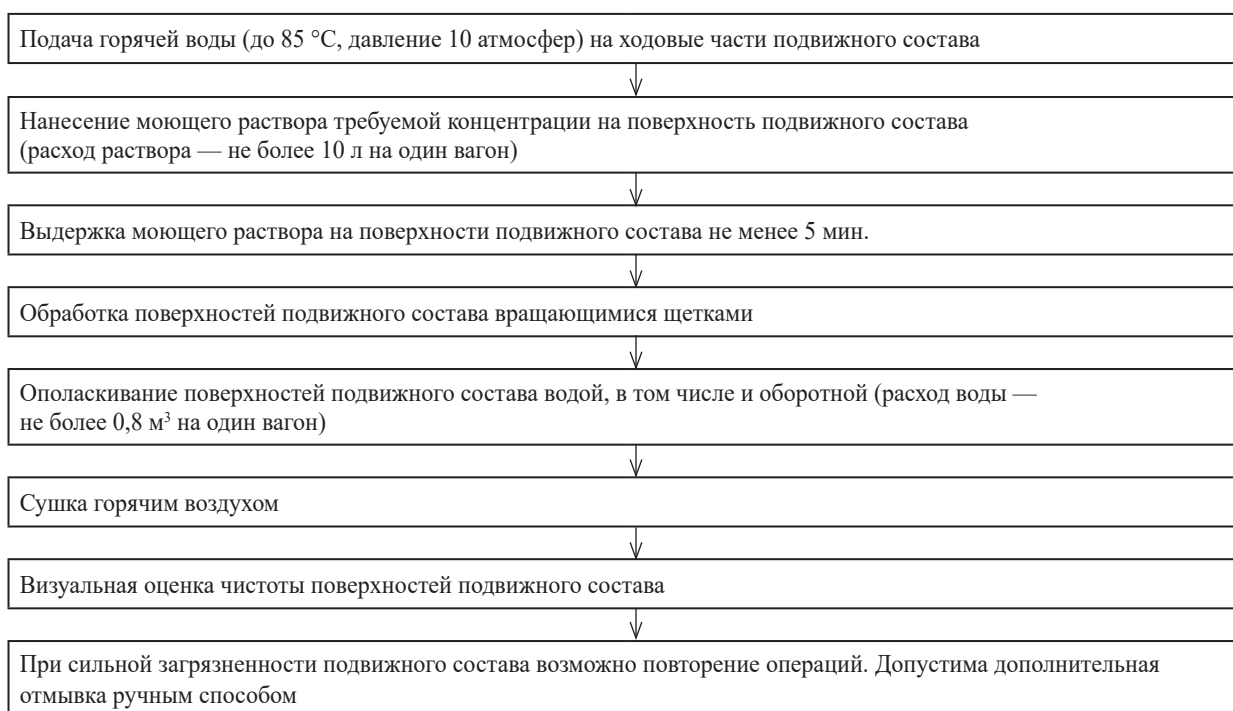


Рис. 2. Метод очистки подвижного состава от загрязнений

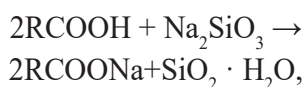
ТАБЛИЦА 3. Способы очистки электрического подвижного состава от эксплуатационных загрязнений

Способы		Применяемые методы и средства
Механические	Ручная очистка	– скребки, щетки, швабры, насадки на электроинструмент, насадки на пневмоинструмент; – пневматическая очистка (сжатым воздухом под давлением 0,5 МПа); – гидродинамическая очистка (водой под давлением от 5 до 20 МПа); – абразивная очистка (потоком абразивных частиц, ускоряемых воздухом или водой); – пескоструйная очистка (струей воздуха с металлической дробью, песком, косточковой крошкой); – бластинг-технологии (мягкие абразивы (сода, ореховая скорлупа) с водой или полиуретановой губкой); – криогенная (гранулами твердой углекислоты (сухой лед) температурой до -80°C). Углекислота «отрывает загрязнения от поверхности»
	Механизированная очистка	Автоматизированные комплексы, оборудованные вращающимися щетками
Химические		Использование моющих средств разной природы
Термические		Использование пара, горячей воды
Комбинированные		Сочетание нескольких методов очистки, например механических и химических

Моющие средства для очистки подвижного состава от эксплуатационных загрязнений					
Неорганические			Органические (основные компоненты: ПАВ, комплексообразователи, регуляторы pH)		
Кислотные	Щелочные	Нейтральные	Порошковые	Жидкие	Пастообразные
Для очистки от застарелых нефтезагрязнений	Для очистки от минеральной смазки, масла СОЖ, пыли, копоти	Для очистки от пыли и других свежих загрязнений	Для очистки от застарелых загрязнений		
Минимальная температура очистки — от 20°C	Минимальная температура очистки — от 40°C	Минимальная температура очистки — от 40°C	Минимальная температура очистки — от 40°C		

Рис. 3. Классификация моющих средств для очистки подвижного состава от эксплуатационных загрязнений

При взаимодействии карбоновой кислоты (RCOOH) и силиката натрия протекает реакция обмена, приводящая к образованию соли карбоновой кислоты и гелеобразного продукта в виде кремнегеля, имеющего специфическую поверхность и способного адсорбировать загрязнения и очищать поверхности.



где RCOOH — карбоновая кислота (R — углеводородный радикал);

Na_2SiO_3 — силикат натрия;

2RCOONa — соль карбоновой кислоты;

$\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ — кремнегель.

Процесс гелеобразования в данном случае является экзотермическим, что позволяет проводить очистку загрязненных поверхностей в стандартных условиях.

Для получения новых моющих композиций предлагается использовать техногенные продукты, содержащие, например, карбоновые кислоты и силикаты щелочных металлов, при взаимодействии которых также образуется гелеобразный продукт (рис. 4).

Использование техногенных продуктов для получения моющих композиций является экономически и экологически целесообразным.

Модельный эксперимент

Модельный эксперимент проводился по следующей схеме. На предварительно обезжиренные, высушенные и взвешенные металлические пластинки наносились загрязнения, отобранные с поверхностей железнодорожного

подвижного состава. Толщина слоя загрязнения контролировалась с помощью микрометра и составляла 150–200 мкм в соответствии с данными табл. 1. Далее загрязненные пластинки выдерживали в эксикаторе в течение нескольких недель для получения застаревших загрязнений. Подготовленные загрязненные пластинки погружали в емкость с моющим раствором. Время выдержки составляло от 5 до 20 мин. После этого поверхность каждой пластинки обрабатывали мягкой нейлоновой щеткой в течение 1 мин. Затем пластинки промывали водой и высушивали до постоянной массы. Метод проведения модельного эксперимента по очистке металлических поверхностей от эксплуатационных загрязнений представлен на рис. 5.

Оценку эффективности очистки проводили гравиметрическим методом. Для этого каждую пластинку взвешивали трижды: до нанесения загрязнения (m_0), после нанесения загрязнения (m_1) и после очистки, сушки и охлаждения (m_2). Степень очистки (E , %) рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \cdot 100\%,$$

где m_0 — масса чистой пластинки, г;

m_1 — масса пластинки с загрязнением до очистки, г;

m_2 — масса пластинки после очистки, г.

Параллельно с гравиметрическим методом проводили визуальную оценку чистоты поверхности по 5-балльной шкале:

5 баллов — полностью чистая поверхность, без видимых загрязнений;

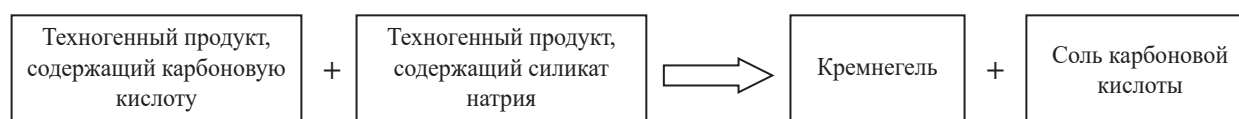


Рис. 4. Процесс гелеобразования

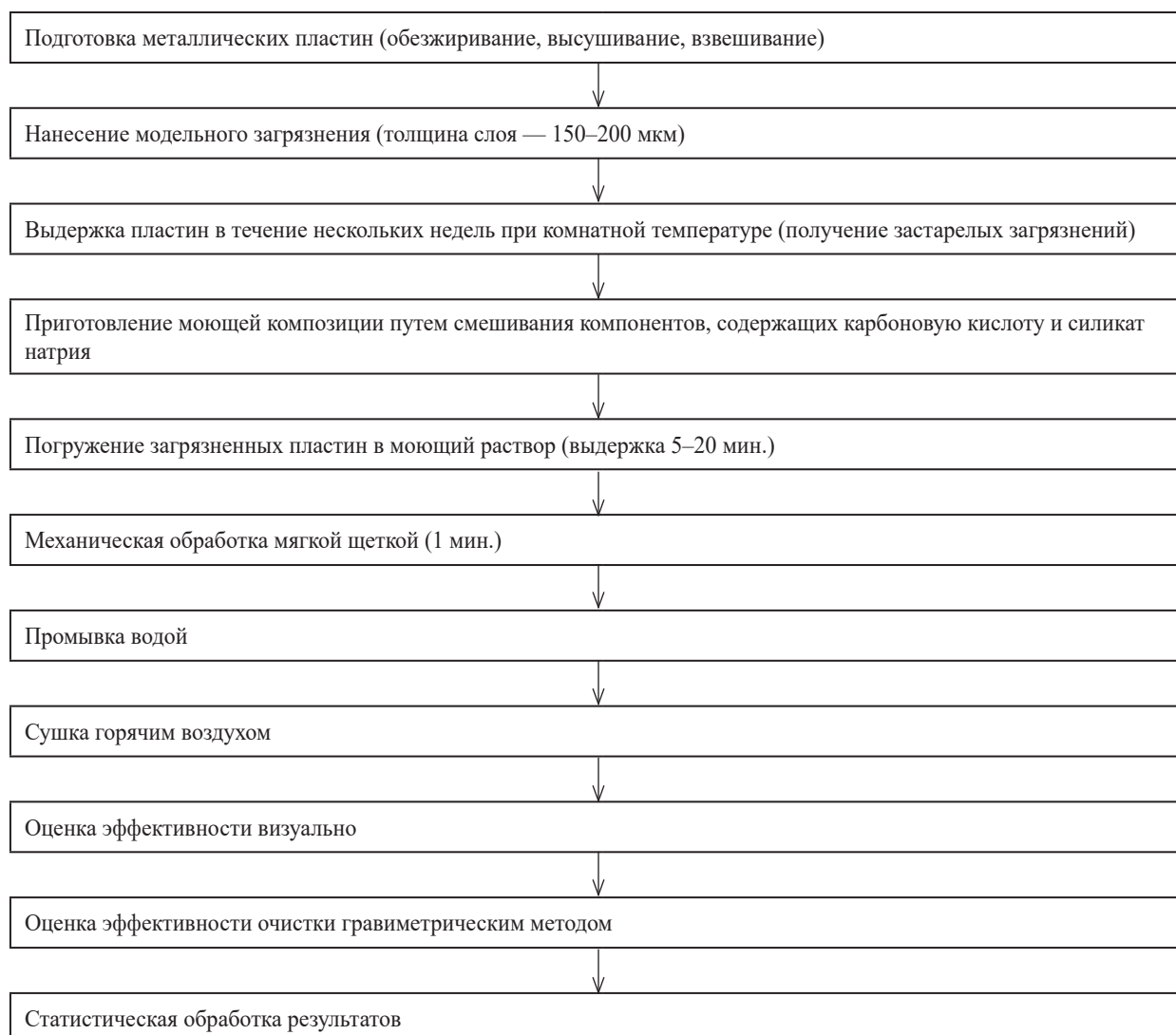


Рис. 5. Метод проведения модельного эксперимента по очистке металлических поверхностей от эксплуатационных загрязнений

4 балла — единичные мелкие пятна;
3 балла — загрязнения занимают до 30 % поверхности;

2 балла — загрязнения занимают 30–70 % поверхности;

1 балл — загрязнение не удалено (более 70 % поверхности).

Таким образом, исследования показали, что наиболее эффективной является моющая композиция, содержащая 70 % техногенного продукта с карбоновой кислотой и 30 % техногенного

продукта с силикатом щелочного металла. При этом процесс очистки проводится в стандартных условиях, а степень очистки составляет 97 %.

Разработка и внедрение новой моющей композиции на базе техногенных продуктов, содержащих карбоновую кислоту и силикат щелочного металла, с определенными рациональными соотношениями компонентов является одним из перспективных направлений совершенствования процесса очистки электрического подвижного состава.

Основные выводы

1. Сформулированы предложения по совершенствованию процесса очистки металлических поверхностей от эксплуатационных загрязнений при техническом обслуживании железнодорожного подвижного состава.

2. Показана возможность очистки металлических поверхностей подвижного состава от эксплуатационных загрязнений новой моющей композицией, полученной на базе техногенных продуктов и имеющей высокие технические характеристики.

3. Определены рациональные соотношения компонентов моющей композиции.

Список источников

1. Иванов А. А. Техническое обслуживание подвижного состава. М.: Транспорт, 2020. 200 с.
2. Макарова Е. И. Комплексная технология очистки поверхностей и утилизация отходов // Транспорт Российской Федерации. 2007. № 12. С. 36–40.
3. Макарова Е. И. Скорости движения и обезвреживания // Мир транспорта. 2013. № 2 (46). С. 224–227.
4. Петров С. И., Сидоров В. К. Коррозия и защита в транспортном машиностроении. СПб.: Профессия, 2018. 180 с.
5. Zhang Wei, Liu Jian. Comparative Study of Train Cleaning Systems in China and Russia // Journal of Railway Engineering. 2022. No. 4. Pp. 45–58.
6. Михайлов Е. Н. Основы коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 2015. 320 с.
7. CRRC Corporation. Green Maintenance Technologies for Rolling Stock. Beijing: CRRC Press, 2020. 210 p.
8. 铁路车辆清洗剂技术条件: 铁道行业标准 TB/T 2968-2017 / 国家铁路局. 中国: 国家铁路局, 2017. 10 с.

9. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) // Official Journal of the European Union. 2006. L 396. Pp. 1–849.

10. CRRC Corporation Limited. Qishuyan Institute: Official Website. URL: <https://www.crrcgc.cc/qsy/> (дата обращения: 22.06.2026).

11. ГОСТ Р 54612-2011. Вагоны пассажирские локомотивной тяги и моторвагонный подвижной состав. Требования к обмывке и очистке. М.: Стандарт-информ, 2012. 16 с.

12. ГОСТ Р 58234-2018. Тяговый подвижной состав. Требования к очистке и обмывке. М.: Стандарт-информ, 2018. 20 с.

13. Макарова Е. И., Бенза Е. В., Старинец М. С. Получение технических моющих средств, не содержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ), с использованием гелеобразования // Вестник Российской академии естественных наук. 2006. № 11. С. 76–78.

14. Макарова Е. И. Научные основы защиты окружающей среды при ликвидации, обезвреживании и блокировании загрязнений железнодорожного транспорта: дисс. ... д-ра техн. наук: 03.02.08. М., 2012. 363 с.

Дата поступления: 03.07.2026

Решение о публикации: 06.08.2026

Контактная информация:

МАКАРОВА Елена Игоревна — доктор техн. наук, профессор; 4578097@mail.ru

ТИМОФЕЕВ Илья Сергеевич — аспирант; ilya_timofeev_01@bk.ru

ЛО Вэйцзе — магистрант; 2668938461@qq.com

Cleaning of Surfaces from Operational Contamination as Part of the Maintenance of Rolling Stock

E. I. Makarova, I. S. Timofeev, Weijie Luo

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Makarova E. I., Timofeev I. S., Luo Weijie. Cleaning of Surfaces from Operational Contamination as Part of the Maintenance of Rolling Stock // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 707–716. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-707-716 (In Russian)

Abstract

During operation, the parts and assemblies of railway rolling stock are inevitably exposed to contamination, which has a heterogeneous composition, specific properties and contributes to the appearance of corrosion processes, as well as the destruction of paintwork. **Objective:** to improve the process of cleaning surfaces from operational contamination during maintenance of rolling stock. **Methods:** physico-chemical methods of analysis; physico-mechanical methods, statistical methods. **Results:** proposals have been formulated to improve the process of cleaning surfaces from operational contamination during maintenance of rolling stock. **Practical significance:** the possibility of cleaning the surfaces of rolling stock from operational contamination with a new detergent composition based on man-made products and having high technical characteristics is shown. The rational ratios of the components of the detergent composition are determined.

Keywords: operational pollution, rolling stock, detergents, corrosion, paint coatings, railway transport, maintenance

References

1. Ivanov A. A. Tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava [Maintenance of Rolling Stock], Moscow, Transport, 2020, 200 p. (In Russian)
2. Makarova E. I. Kompleksnaya tekhnologiya ochestki poverkhnostej i utilizatsiya othodov [Integrated Technology for Surface Cleaning and Waste Disposal], *Transport Rossijskoj Federacii [Transport of the Russian Federation]*, 2007, no. 12, pp. 36–40. (In Russian)
3. Makarova E. I. Skorosti dvizheniya i obezvrezhivaniya [Speeds of Movement and Neutralization], *Mir transporta [World of Transport]*, 2013, no. 2 (46), pp. 224–227. (In Russian)
4. Petrov S. I., Sidorov V. K. Korroziya i zashchita v transportnom mashinostroenii [Corrosion and Protection in Transport Engineering], St. Petersburg: Professiya Publishers, 2018, 180 p. (In Russian)
5. Zhang Wei, Liu Jian. Comparative Study of Train Cleaning Systems in China and Russia, *Journal of Railway Engineering*, 2022, no. 4, pp. 45–58.
6. Mikhailov E. N. Osnovy korrozii i zashchity metallov [Fundamentals of Corrosion and Metal Protection], Moscow, Metallurgiya Publishers, 2015, 320 p. (In Russian)
7. CRRC Corporation. Green Maintenance Technologies for Rolling Stock, Beijing, CRRC Press, 2020, 210 p.
8. Tielu cheliang qingxiji jishu tiaojian: Tie Dao Hangye Biaozhun TB/T 2968-2017 [Technical Conditions for Railway Vehicle Cleaning Agents: Railway Industry Standard TB/T 2968-2017], issued by National Railway Administration, China: National Railway Administration, 2017, 10 p. (In Chinese)
9. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006

concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), 2006, L 396, pp. 1–849.

10. CRRC Corporation Limited. Qishuyan Institute: Official Website. URL: <http://www.crrcgc.cc/qsy> (accessed: June 22, 2026).

11. GOST R 54612-2011. Vagony passazhirskie lokomotivnoj tyagi i motorvagonnyj podvizhnoj sostav. Trebovaniya k obmyvke i ochistke [Passenger Cars of Locomotive Traction and Motor-Coach Rolling Stock. Requirements for Washing and Cleaning], Moscow, Standartinform, 2012, 16 p. (In Russian)

12. GOST R 58234-2018. Tyagovyj podvizhnoj sostav. Trebovaniya k ochistke i obmyvke [Traction Rolling Stock. Requirements for Cleaning and Washing], Moscow, Standartinform, 2018, 20 p. (In Russian)

13. Makarova E. I., Benza E. V., Starinets M. S. Poluchenie tekhnicheskikh moyushchih sredstv, ne sodержashchih poverhnostno-aktivnyh veshchestv (PAV), s ispolzovaniem geleobrazovaniya [Production of Technical Detergents Free of Surfactants (SA)

Using Gel Formation], *Vestnik Rossijskoj akademii estestvennyh nauk [Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences]*, 2006, no. 11, pp. 76–78. (In Russian)

14. Makarova E. I. Nauchnye osnovy zashchity okruzhayushchej sredy pri likvidacii, obezvrezhivanii i blokirovanii zagryaznenij zheleznodorozhnogo transporta [Scientific Foundations of Environmental Protection in the Elimination, Neutralization and Blocking of Railway Transport Pollution]. Doctor of Engineering Sciences diss., February 03, 2008, Moscow, 2012, 363 p. (In Russian)

Received: July 03, 2026

Accepted: August 06, 2026

Author's information:

Elena I. MAKAROVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; 4578097@mail.ru

Il'ya S. TIMOFEEV — Postgraduate Student; ilya_timofeev_01@bk.ru

Weijie LUO — Master's Student; 2668938461@qq.com

УДК 539.52

Вариант представления поверхности нагружения и возможные ее формы в условиях двумерной задачи

К. В. Сливец, В. Н. Парамонов

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

Для цитирования: Сливец К. В., Парамонов В. Н. Вариант представления поверхности нагружения и возможные ее формы в условиях двумерной задачи // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 717–726. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-717-726

Аннотация

Цель: выявление формы поверхности текучести и анализ ее изменения в зависимости от траектории нагружения. Объектом исследования является базовое понятие теории пластичности — поверхность нагружения материала. Предмет исследования — возможное представление и форма поверхности нагружения в условиях двумерной задачи. **Методы:** описание свойств упругости и пластичности производилось при помощи упрощенной механической модели, представляющей собой фрагмент тонкостенной трубы. Материал трубы обладает свойствами идеально упругопластической среды, что соответствует его работе по диаграмме Прандтля. Рассматривается загрузка модели в перемещениях, реализуемое путем задания поворота поперечного торцевого сечения трубы. Рассмотрены различные схемы нагружения, в соответствии с которыми нейтральная ось могла как совпадать декартовыми осями в течение всего процесса нагружения, так и поворачиваться в процессе нагружения. Результирующий угол поворота сечения ϕ можно разложить на компоненты $[\phi_x, \phi_y]^T$, операции над которыми аналогичны операциям над компонентами вектора. Таким образом, угол поворота можно рассматривать как вектор, являющийся характеристикой нагружения механической системы и полностью определяющий ее деформированное состояние. Аналогично, если нагружение системы осуществляется посредством результирующего момента $\tilde{M}$ с компонентами $[\tilde{M}_x, \tilde{M}_y]^T$, то в этом случае однозначно определяется ее напряженное состояние. Вместе $\tilde{M}$ и ϕ характеризуют напряженно-деформированное состояние системы. Элементарный объем сплошного тела также можно рассмотреть как механическую систему. Для описания ее напряженно-деформируемого состояния служит соответствующий тензор. Здесь возникает определенное противоречие, так как для упрощенной механической модели характеристикой силового воздействия будет являться вектор, а для элементарного объема — тензор. Вопрос об описании тензора через некоторый вектор может быть решен с использованием представления Ильюшина, по которому девiatorу напряжений ставится в соответствие вектор с определенными координатами. В этих координатах также можно изобразить поверхность нагружения и проследить динамику ее изменения. **Результаты:** даже для малого уровня интенсивности пластических деформаций форма и размеры поверхности нагружения сильно зависят от траектории нагружения. Для изотропного тела указанный факт может быть объяснен только трансформацией остаточных напряжений в модели. **Практическая значимость:** предложенный подход позволяет применить упрощенную механическую модель к анализу трансформации поверхностей нагружения (деформирования) для широкого спектра траекторий.

Ключевые слова: пластичность, поверхность нагружения, поверхность деформирования, начальные напряжения

Подход к описанию упругопластических свойств материалов с применением механических моделей разной степени сложности использовали многие авторы [1–4]. Такие модели позволяют получить эффекты, наблюдаемые в реальных материалах, работающих за пределами упругости. Рассмотренная далее упрощенная механическая модель, предложенная впервые Ю. Н. Работновым, с одной стороны, является максимально простой, а с другой — отражает особенности упругопластического поведения сплошных сред.

Упрощенная механическая модель представляет собой систему в виде тонкостенной трубы радиусом R , с толщиной стенки δ , модуль упругости материала трубы E , предел текучести σ_T . В общем случае труба подвержена действию двух моментов — M_x и M_y . Следует отметить, что Ю. Н. Работновым данная модель использовалась для определения границ применимости деформационной теории пластичности.

Также для наглядности будем рассматривать отрезок трубы единичной длины $L = 1$ и выражать ее деформацию от действия момен-

та в угле поворота торцевого сечения φ . Тогда можем записать:

$$\varphi_T = \frac{M \cdot L}{\pi R^3 \delta E}, \quad (1)$$

Максимальный угол поворота φ_T , соответствующий работе сечения в упругой стадии:

$$\varphi_T = \sigma_T / (ER).$$

И аналогичный момент:

$$M_T = \pi \sigma_T R^2 \delta / L.$$

Далее в зависимостях будем использовать относительные величины $\tilde{M}$ и $\tilde{\varphi}$, равные

$$\tilde{M} = M / M_T \text{ и } \tilde{\varphi} = \varphi / \varphi_T,$$

где M и φ — результирующие момента и угла поворота соответственно.

Начальное состояние модели отвечает условиям изотропного симметричного тела (среды), которое будет характеризоваться поверхностью текучести, имеющей форму окружности. Ее выражение в параметрической форме:

$$\sqrt{\tilde{M}_x^2 + \tilde{M}_y^2} = 1.$$

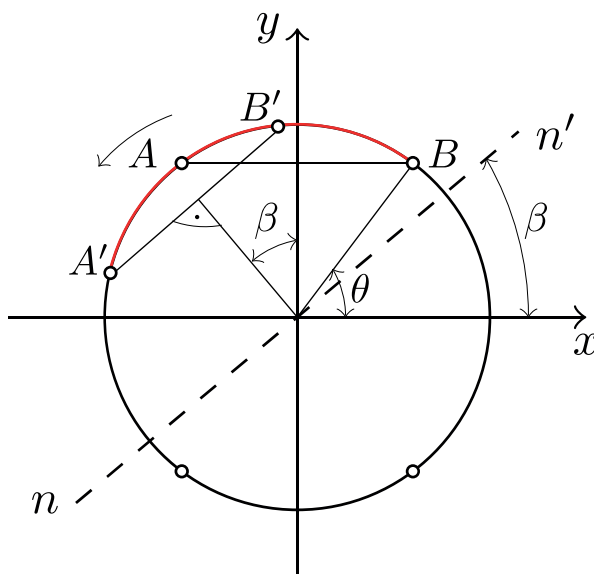


Рис. 1. Схема работы модели за пределом упругости

Хотя для двумерного случая это кривая линия, для сохранения общности терминологии будем использовать название «поверхность». В пространстве деформаций область упругого и пластического деформирования будет разделять поверхность деформирования.

Рассмотрим простое нагружение модели, соответствующее увеличению момента $\tilde{M}_x$ при сохранении $\tilde{M}_y = 0$. От действия этой нагрузки сначала наиболее удаленная точка от оси x , а потом и некоторая часть сечения трубы (дуга АВ, рис. 1) переходит в пластическое состояние. Охарактеризуем размеры данной области углом θ . При нагружении он будет расти от 0° и далее асимптотически приближаться к 90° , что будет характеризовать процесс постепенного перехода всего сечения в пластику.

Можно показать, что при простом нагружении с учетом развития пластической зоны зависимость между результирующим моментом и углом поворота имеет вид:

$$\tilde{M} = \frac{2\tilde{\phi}}{\pi} \left(\sin^{-1}(1/\tilde{\phi}) + \frac{1}{\tilde{\phi}} \sqrt{1 - \frac{1}{\tilde{\phi}^2}} \right), \quad (2)$$

в котором

$$\tilde{\phi} = \sqrt{\tilde{\phi}_x^2 + \tilde{\phi}_y^2} > 1 \text{ и } \tilde{M} = \sqrt{\tilde{M}_x^2 + \tilde{M}_y^2} > 1.$$

График зависимости (2) представлен на рис. 2. Из него вытекает, что рассматриваемая модель описывает упрочняющееся упругопластическое тело (среду), поэтому поверхность текучести, являющаяся границей в пространстве напряжений, отделяющая упругую область от пластической, будет носить название поверхности нагружения [5].

Результирующий угол поворота сечения $\tilde{\phi}$ можно разложить на компоненты $[\tilde{\phi}_x, \tilde{\phi}_y]^T$, операции над которыми аналогичны операциям над компонентами вектора. Таким образом, угол поворота можно рассматривать как вектор, являющийся характеристикой нагружения механической системы и полностью определяющий ее напряженно-деформированное состояние. Требуется решить вопрос о том, что для упрощенной механической модели характеристикой нагружения будет являться вектор, а для элементарного объема — тензор. Для решения данного вопроса воспользуемся представлением А. А. Ильюшина [6], развитым в работах В. Г. Зубчанинова [7]. В соответствии с ним тензору девиатора напряжений соответствует вектор с вычисляемыми координатами:

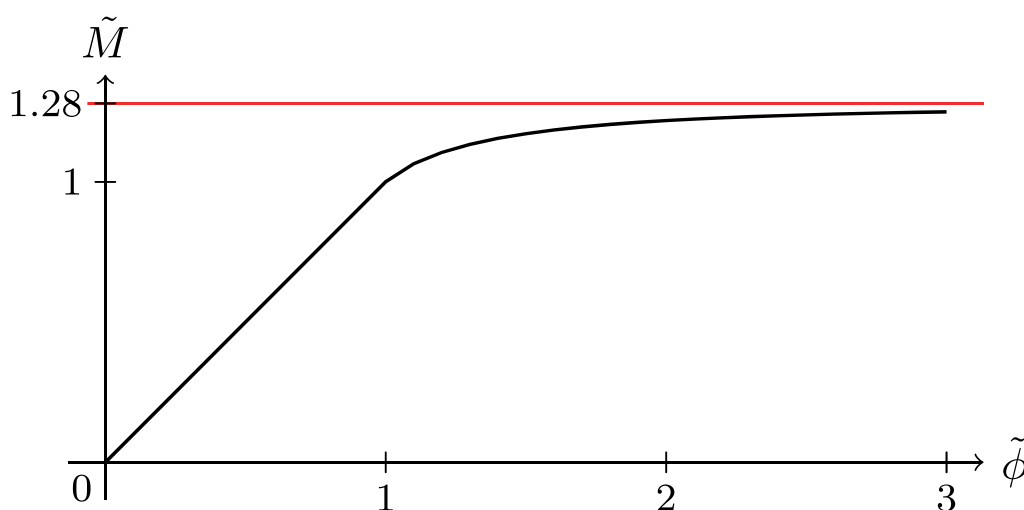


Рис. 2. Зависимость поворота от результирующего момента

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2}s_{11} \\ \sqrt{2}(s_{22} + s_{11})/2 \\ \sqrt{2}s_{12} \\ \sqrt{2}s_{23} \\ \sqrt{2}s_{31} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где s_{ij} — компоненты девиатора напряжений.

Как известно, в механике твердого деформируемого тела существуют два вида плоского напряженно-деформированного состояния: плоское напряженное состояние ($\sigma_3 = 0$ и $\varepsilon_3 \neq 0$) и плоская деформация ($\sigma_3 \neq 0$ и $\varepsilon_3 = 0$). Возможно также использовать понятие двумерного состояния, в котором $\sigma_3 = 0$ и $\varepsilon_3 = 0$. Ему можно найти механические аналоги. Так, если рассмотреть систему из дисков, выполненных из жесткого и прочного материала, взаимодействующих между собой посредством пружин, жесткость которых много меньше, чем у материала дисков, то напряженно-деформированное состояние такой среды может рассматриваться как истинное двумерное, а в целом решение задач в подобной постановке соответствует так называемому методу дискретных элементов [8–9].

Для двумерной среды в представлении А. А. Ильюшина (3) только три компоненты пятимерного вектора будут отличны от нуля:

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2}s_{11} \\ \sqrt{2}(s_{22} + s_{11})/2 \\ \sqrt{2}s_{12} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Учитывая, что для двумерной задачи всегда $s_{11} = -s_{22}$, либо $-s_{11} = s_{22}$, вторая координата вектора становится равной нулю. Для просто-

ты возможно рассмотреть двумерный вектор со следующими координатами:

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} (s_{22} - s_{11})/2 \\ s_{12} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Далее перейдем к безразмерным величинам компонент вектора нагружения. Для этого воспользуемся критерием, который аналогичен критерию Мизеса. Обозначим интенсивность напряжений, при которой наступает пластическая деформация через σ_u , тогда начальная поверхность нагружения будет задаваться уравнением $\sigma_u = (1/2 s_{ij} s_{ij})^{1/2}$, где s_{ij} — компоненты девиатора напряжений. Для компонент девиатора напряжений и вектора нагружения перейдем от тензорного (нумерованного) обозначения осей к их обозначению через декартовы оси. Теперь выразим вектор нагружения в относительных величинах, тогда:

$$\tilde{\bar{S}} = \begin{bmatrix} \tilde{S}_x \\ \tilde{S}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (s_{yy} - s_{xx})/\sigma_u \\ s_{xy}/\sigma_u \end{bmatrix}, \quad (5)$$

В нашей задаче величина $\tilde{M}_x$ соответствует $\tilde{S}_x$, а $\tilde{M}_y$ — $\tilde{S}_y$ и, по аналогии с уравнением (1), условие текучести будет уравнением окружности единичного радиуса.

Аналогичные рассуждения можно применить и к деформациям, получив соответствующий вектор:

$$\tilde{\bar{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \tilde{\varepsilon}_x \\ \tilde{\varepsilon}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (e_{yy} - e_{xx})/\varepsilon_u \\ e_{xy}/\varepsilon_u \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\tilde{\varepsilon}_i$ — компоненты вектора;

e_{ij} — компоненты девиатора деформаций;

$\varepsilon_u = (2/3 e_{ij} e_{ij})^{1/2}$ — интенсивность деформаций, соответствующая начальной поверхности деформирования.

Принятые интерпретации (4–6) позволяют выразить траекторию нагружения (в напряжениях или деформациях) для двумерной среды в векторном пространстве. Рассматривая упрощенную механическую систему, можно предположить некоторые соответствия. Так, величину $\tilde{\mathcal{E}}_x$ можно соотнести с $\tilde{\varphi}_x$, а $\tilde{\mathcal{E}}_y$ — с $\tilde{\varphi}_y$. Теперь возможно реализовать векторную траекторию непосредственно на упрощенной механической модели, то есть в конечном итоге промоделировать в ней траекторию из пространства девиатора напряжений (деформаций).

Выполним предварительный анализ основных траекторий нагружения в заявленных координатах на предмет их соответствия основным схемам загрузки. Увеличение $\tilde{S}_x$ при $\tilde{S}_y = 0$ будет соответствовать чистому девиаторному нагружению, при котором оси декартовой системы координат образца совпадают с осями главных напряжений. Графически траектория соответствует отрезку Oa (рис. 3). Достижение величиной $\tilde{S}_x$ значений более 1 означает выход системы в пластику, движение в обратном направлении по траектории aO — разгрузку (рис. 3).

Увеличение $\tilde{S}_y$ при $\tilde{S}_x = 0$ в двумерной модели будет соответствовать чистому девиаторному нагружению, при котором оси главных напряжений будут ориентированы под углом 45°

к декартовым осям (отрезок Ob). Аналогично движение по bO будет разгрузкой. Согласованное изменение $\tilde{S}_y$ и $\tilde{S}_x$, соответствующее движению по дуге ab или ba , будет означать поворот главных осей до угла 45° при сохранении интенсивности напряжений, достигнутых ранее по оси $\tilde{S}_x$ или $\tilde{S}_y$ соответственно (рис. 3). Можно рассмотреть аналогичные траектории и в пространстве деформаций (рис. 4).

В упрощенной модели рассмотрим простую программу нагружения, которой присвоим номер 1а. Она будет характеризоваться увеличением угла поворота $\tilde{\varphi}_x$. Для двумерной среды в принятых нами координатах векторного представления загрузка будет соответствовать увеличению $\tilde{\mathcal{E}}_x$ при сохранении $\tilde{\mathcal{E}}_y = 0$ (отрезок Oa). Далее следует разгрузка в перемещениях до нуля (отрезок aO), то есть возврат сечения в исходное положение. Поскольку загрузка было выполнено за пределы упругой области, то следует ожидать изменения очертаний начальной поверхности нагружения.

Для нахождения ее новой формы реализовывался алгоритм, состоящий в следующем. Возврат сечения в исходное положение после нагружения за пределами упругости будет характеризоваться наличием остаточных напряжений, эпюра которых известна. Эпюра —

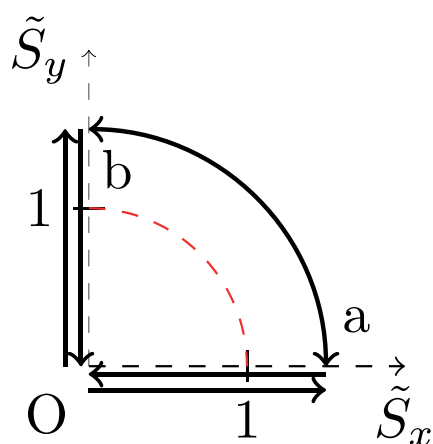


Рис. 3. Основные траектории нагружения

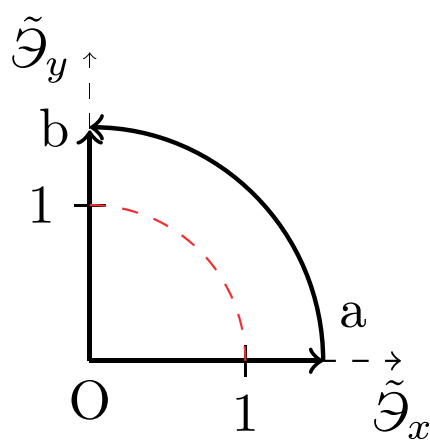


Рис. 4. Основные траектории деформирования

графическое представление распределения напряжений в стенке трубы на ее развертке, то есть на развертке окружности. Как будет показано далее, эпюры остаточных напряжений для каждой траектории существенно отличаются. Однако возможно найти приращения углов, позволяющих разгрузить систему уже под напряжением, то есть найти такое положение сечения, при котором оба момента будут равны нулю. Далее от этой нулевой точки реализовывалась серия всеерных нагружений. По каждому из лучей нагружение осуществлялось до того момента, когда одно из волокон сечения переходит в пластику, при этом осуществлялась фиксация соответствующих компонент вектора нагружения. Очевидно, что найденные таким образом компоненты являются координатами точки, которая лежит на поверхности нагружения. Каждое из пробных нагружений осуществлялось малым шагом. Угол между лучами принимался также малым — равным 1° .

Найденная на основе описанного выше алгоритма поверхность нагружения для траектории № 1a представлена на рис. 5.

Видно, что описываемая в векторном представлении Ильюшина поверхность отражает ряд наблюдаемых на практике эффектов, прежде всего эффект Баушингера. Действительно, шлемовидная форма наглядно описывает эффект снижения предела упругости при нагружении в обратном направлении.

Программа № 1б аналогична № 1a, но при пластическом нагружении по $\tilde{\mathcal{E}}_y$.

Далее определялись очертания поверхности при сложном нагружении по программе № 2. Задача также решалась в перемещениях. Программа реализовывала следующую схему векторной траектории нагружения двумерной среды: от начального изотропного состояния увеличивался $\tilde{\mathcal{E}}_x$ (увеличение $\tilde{\varphi}_x$ в модели) и доводился до уровня 1,5 (отрезок Оа на рис. 4). Затем девиаторным (в перемещениях)

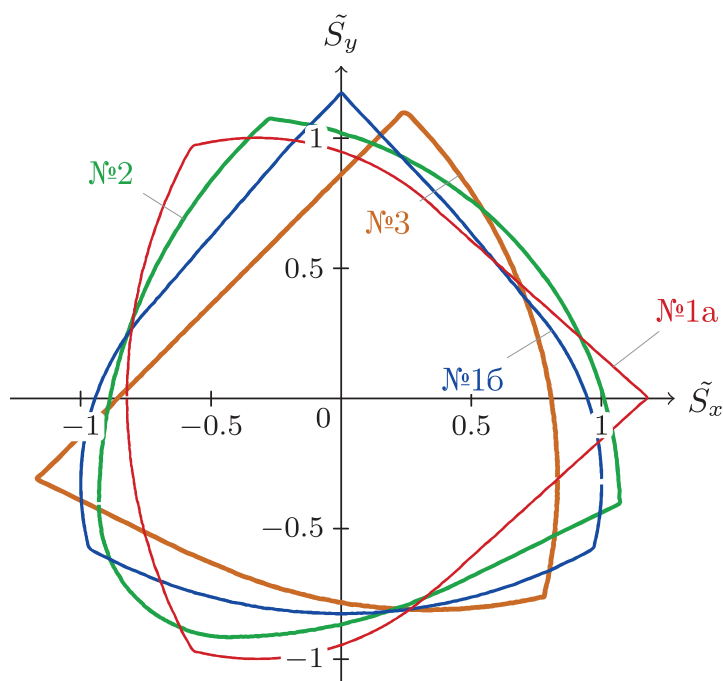


Рис. 5. Очертания поверхностей нагружения после реализации соответствующих программ нагружения

загрузением, характеризующимся согласованным уменьшением $\tilde{\mathcal{E}}_x$ и увеличением $\tilde{\mathcal{E}}_y$ (согласованным уменьшением $\tilde{\varphi}_x$ и увеличением $\tilde{\varphi}_y$ в упрощенной модели), система приводилась в конечное положение (дуга ab на рис. 4). Данная траектория создает условия, когда сектор пластической зоны поворачивается вслед за загрузением (рис. 1). Следует отметить, что как угол поворота этого сектора β , так и его размер (длина дуги $A'B'$) и положение нейтральной оси $n-n'$ в этом случае, вообще говоря, неизвестны. Полученная для программы № 2 поверхность текучести представлена на рис. 5.

Наконец, программа № 3 состояла в загрузении из начального изотропного состояния в следующей последовательности. Нагружение по отрезку Oa рост $\tilde{\mathcal{E}}_x$ (увеличение $\tilde{\varphi}_x$ в модели), затем разгрузка в обратном направлении по aO до $\tilde{\mathcal{E}}_x = 0$ (до $\tilde{\varphi}_x = 0$ в модели). Затем повторное нагружение, но уже в перпендикулярном направлении по Ob рост $\tilde{\mathcal{E}}_y$ (рост $\tilde{\varphi}_y$ в модели) и после — разгрузка $\tilde{\mathcal{E}}_y = 0$ ($\tilde{\varphi}_y = 0$ в модели). Полученная для программы № 3 поверхность текучести представлена на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что форма поверхности нагружения для изначально изотропного тела даже при незначительных пластических деформациях меняется значительно, при этом зависит от пути нагружения. Используемые для описания такого рода явлений зависимости называются Ю. К. Зарецким голономными [10].

Представленная модель может быть рассмотрена как упрощенное описание механизма пластичности для плоской схемы. В ней трансформация поверхности нагружения в изначально изотропном теле обусловлена прежде всего влиянием остаточных напряжений [11], поскольку иные факторы, связанные с неоднородностью тела, отсутствуют.

Полученные в модели эпюры остаточных напряжений приведены на рис. 6. На нем напряжения отображены в виде развертки круглого сечения. Каждой точке круглого сечения, положение которой задается полярным углом α , на развертке соответствует точка с координатой по оси x — численно равной значению угла α в радианах (в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 2\pi$). Начало отсчета и положительное направление согласованы с углом θ (см. рис. 1). Для всех указанных

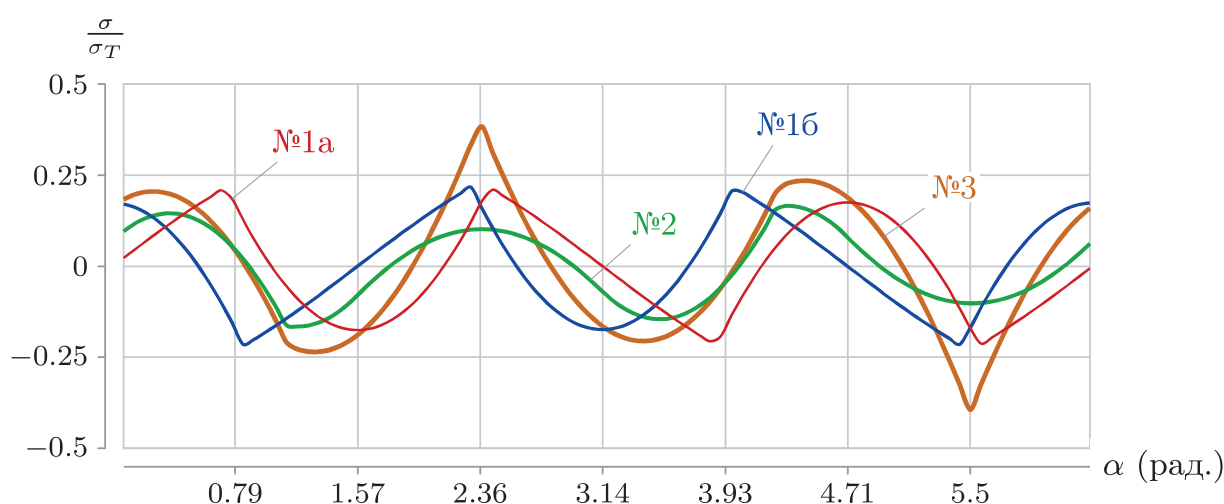


Рис. 6. Эпюры остаточных напряжений по результатам различных программ нагружений

точек приведена относительная величина остаточного напряжения.

Можно сделать вывод, что после реализации конкретной траектории нагружения реальное тело также будет характеризоваться определенным видом распределения остаточных напряжений, которые, в свою очередь, влияют на форму поверхности нагружения.

Для реальных материалов характерна неоднородность прочностных и деформационных свойств, поэтому даже отыскание начальной поверхности нагружения в них является весьма трудоемкой задачей. Как отмечалось в работах [3, 12], граница пластичности существенно зависит от принимаемого допуска на предельную пластическую деформацию. Такие выводы сделаны В. В. Новожиловым [3] на основании обобщения результатов как собственных экспериментальных исследований, так и других авторов.

Предложенный подход позволяет применить упрощенную механическую модель к анализу трансформации поверхностей нагружения (деформирования) для широкого спектра траекторий. Рассматриваемая модель обладает рядом преимуществ: изотропность механических свойств, четкие очертания начальной поверхности нагружения. Учитывая это, а также тот факт, что в ней очевидны механизмы, приводящие к трансформации поверхности нагружения и в целом отвечающие за упругопластическое поведение тела, она может служить инструментом для построения не только математической, но и физической теории пластичности.

Список источников

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. Работнов Ю. Н. Модель, иллюстрирующая некоторые свойства упрочняющегося пластическо-

го тела // Прикладная математика и механика. 1959. Т. 23, вып. 1. С. 164–168.

3. Новожилов В. В., Кадашевич Ю. И. Микронапряжения в конструкционных материалах. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990. 223 с.

4. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. М.: Физматлит, 2001. 704 с.

5. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.

6. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. 2-е изд. М.: URSS, 2016. 272 с.

7. Зубчанинов В. Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. 356 с.

8. Дидух Б. И. Упругопластическое деформирование грунтов. М.: Изд-во Университета дружбы народов, 1987. 166 с.

9. Бригер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 233 с.

10. Cundall P. A., Strack O. D. L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies // Geotechnique. 1979. No. 29 (1). Pp. 47–65.

11. Зарецкий Ю. К. Лекции по современной механике грунтов. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского университета, 1989. 608 с.

12. Новожилов В. В. Экспериментальное исследование поверхности текучести при сложных путях деформирования // Вопросы долговременной прочности энергетического оборудования: Труды Центрального котлотурбинного института имени И. И. Ползунова. Л., 1986. Вып. 230. С. 68–73.

Дата поступления: 20.04.2026

Решение о публикации: 26.06.2026

Контактная информация:

СЛИВЕЦ Константин Владимирович — кандидат техн. наук, доцент; soiltech@yandex.ru
ПАРАМОНОВ Владимир Николаевич — доктор техн. наук, профессор; parvn@georec.spb.ru

Possible Representation of the Yield Surface and Its Possible Shapes in a Two-Dimensional Problem

K. V. Slivetz, V. N. Paramonov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Slivetz K. V., Paramonov V. N. Possible Representation of the Yield Surface and Its Possible Shapes in a Two-Dimensional Problem // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 717–726. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-717-726 (In Russian)*

Abstract

Objective: the identification of the shape of the yield surface and analysis of the change in its shape depending on the loading path. The object of research is the basic concept of the theory of plasticity – the loading surface of the material. The subject is the possible representation and shape of the loading surface in a two-dimensional problem. **Methods:** the article considers a simplified two-dimensional model representing a fragment of a thin-walled pipe. The pipe material is elastic-perfectly plastic material, in accordance with Prandtl diagram. Displacement-Controlled loading for model is assumed. The load is represented by rotation of the pipe cross-section, realized about either a single Cartesian axis or two axes simultaneously. It is shown that load can be considered as a vector. But stress and strain in a point of the body given in term of Tensor Analysis. This issue can be resolved using the Ilyushin representation, according to which a vector is assigned to the deviatoric stress tensor. **Results:** even for a low level of plastic deformation intensity, the shape and size of the loading surface strongly depend on the loading path. For an isotropic body, this fact can only be explained by the transformation of residual stresses in the body. **Practical significance:** the proposed approach allows us to apply a simplified mechanical model to the analysis of the transformation of yield surfaces for a wide range of load paths and compare the results with those obtained for real materials.

Keywords: plasticity, yield surface, deformation surface, residual stresses

References

1. Rabotnov Yu. N. Polzuchest' elementov konstruktsiy [Creep of Structural Elements], Moscow, Nauka, 1966, 752 p. (In Russian)
2. Rabotnov Yu. N. Model', illyustriruyushchaya nekotorye svoystva uprochnyayushchegosya plasticheskogo tela [A Model Illustrating Some Properties of a Strengthening Plastic Body], *Prikladnaya matematika i mekhanika [Journal of Applied Mathematics and Mechanics]*, 1959, vol. 23, no. 1, pp. 164–168. (In Russian)
3. Novozhilov V. V., Kadashevich Yu. I. Mikro-naprazheniya v konstruktsionnykh materialakh [Micro-stresses in Structural Materials], Leningrad, Mashinostroenie. Leningradskoe otделение [Machine-Building. Leningrad Branch], 1990, 223 p. (In Russian)
4. Ishlinskiy A. Yu., Ivlev D. D. Matematicheskaya teoriya plastichnosti [Mathematical Theory of Plasticity], Moscow, Fizmatlit [Physics and Mathematics Literature], 2001, 704 p. (In Russian)
5. Kachanov L. M. Osnovy teorii plastichnosti [Fundamentals of the Theory of Plasticity], Moscow, Nauka, 1969, 420 p. (In Russian)
6. Ilyushin A. A. Plastichnost'. Osnovy obshchey matematicheskoy teorii [Plasticity. Fundamentals of the General Mathematical Theory], 2nd ed., Moscow, URSS, 2016, 272 p. (In Russian)
7. Zubchaninov V. G. Mekhanika protsessov plasticheskikh sred [Mechanics of Processes in Plastic Media], Moscow, Fizmatlit [Physics and Mathematics Literature], 2010, 356 p. (In Russian)

8. Didukh B. I. Uprugoplasticheskoe deformirovanie gruntov [Elastoplastic Deformation of Soils], Moscow: Izdatel'stvo Universiteta Druzhby Narodov [Publishing House of Peoples' Friendship University], 1987, 166 p. (In Russian)

9. Briger I. A. Ostatochnye napryazheniya [Residual Stresses], Moscow: Mashgiz [Machine-Building State Publishing House], 1963, 233 p. (In Russian)

10. Cundall P. A., Strack O. D. L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, 1979, no. 29 (1), pp. 47–65.

11. Zaretskiy Yu. K. Lektsii po sovremennoy mekhanike gruntov [Lectures on Modern Soil Mechanics], Rostov-on-Don, Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta [Publishing House of Rostov University], 1989, 608 p. (In Russian)

12. Novozhilov V. V. Eksperimental'noe issledovanie poverkhnosti tekuchesti pri slozhnykh

putyakh deformirovaniya [Experimental Study of the Yield Surface under Complex Deformation Paths], *Voprosy dolgovremennoy prochnosti energeticheskogo oborudovaniya: Trudy Tsentral'nogo kotloturbinnogo instituta imeni I. I. Polzunova* [Issues of Long-Term Strength of Power Equipment: Proceedings of the I. I. Polzunov Central Boiler and Turbine Institute], Leningrad, 1986, issue 230, pp. 68–73. (In Russian)

Received: April 20, 2026

Accepted: June 26, 2026

Author's information:

Konstantine V. SLIVETZ — PhD in Engineering,
Associate Professor; soiltech@yandex.ru

Vladimir N. PARAMONOV — PhD in Engineering,
Professor; parvn@georec.spb.ru

УДК 656.025.2

Прогнозирование суточных изменений пассажиропотоков в агломерации крупного города на основе данных сотовых операторов

А. В. Мартыненко

Уральский государственный университет путей сообщения, Россия, 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Для цитирования: Мартыненко А. В. Прогнозирование суточных изменений пассажиропотоков в агломерации крупного города на основе данных сотовых операторов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 727–742. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-727-742

Аннотация

Цель: разработка и сравнительный анализ моделей краткосрочного прогнозирования общих суточных межмуниципальных пассажиропотоков в агломерации крупного города на основе данных сотовых операторов; определить подходы, обеспечивающие наибольшую точность прогноза. **Методы:** линейные, логлинейные и пуассоновские регрессии, модель Хольта — Винтерса, SARIMA и комбинированные модели, сочетающие регрессионную часть с моделями временных рядов. Качество прогнозов оценивалось по показателям MAE, R², sMAPE. **Результаты:** установлено, что динамика общих межмуниципальных пассажиропотоков определяется сочетанием календарных и погодных факторов, а также выраженной недельной сезонностью и краткосрочной инерционностью. Показано, что модели, калибруемые отдельно по каждой корреспонденции, обеспечивают более высокое качество прогноза по сравнению с моделями на объединенных панельных данных. Наилучшие результаты получены для комбинированных моделей: «линейная регрессия + HW» и «линейная регрессия + SARIMA». Установлено также, что избыточная детализация календарных факторов не улучшает точность прогноза. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при решении задач оперативного управления транспортной системой агломерации, включая оценку ожидаемой нагрузки на межмуниципальные связи и обоснование параметров транспортного обслуживания. Прогнозирование общего пассажиропотока по данным сотовых операторов позволяет дополнить прогнозы по отдельным видам транспорта оценкой совокупного спроса на поездки. Это, в частности, представляет интерес для анализа и планирования пригородных железнодорожных перевозок.

Ключевые слова: транспортное моделирование, пассажиропотоки, межмуниципальные корреспонденции, краткосрочное прогнозирование, данные сотовых операторов, Екатеринбургская агломерация, временные ряды, SARIMA, модель Хольта — Винтерса, пригородные железнодорожные перевозки

Введение

Пассажиропотоки характеризуются существенной изменчивостью во времени, поскольку транспортная подвижность населения формируется под влиянием большого количества разнообразных факторов. В пределах одного и того же направления транспортный

спрос может существенно различаться по дням недели, сезонам и отдельным периодам года. Поэтому для принятия обоснованных решений в сфере управления транспортной системой необходимы как можно более точные прогнозы временных колебаний пассажиропотоков.

Задачи прогнозирования пассажиропотоков существенно различаются в зависимости от временного горизонта, пространственного масштаба и вида транспорта. Краткосрочные прогнозы обычно используются для решения задач оперативного управления перевозочным процессом, включая корректировку расписания, распределение подвижного состава по маршрутам, управление интервалами движения и снижение риска перегрузок [1, 2]. Средне- и долгосрочные прогнозы применяются при планировании развития маршрутной сети, обновлении подвижного состава, модернизации транспортной инфраструктуры и обосновании инвестиционных решений [3–5]. Для моделирования используются различные методы: простые экстраполяционные подходы, регрессионный анализ, модели временных рядов, методы машинного обучения и комбинированные подходы, сочетающие учет внешних факторов с анализом внутренней временной структуры пассажиропотока [6–8].

Среди указанных подходов в исследованиях временной динамики пассажиропотоков наиболее широко представлены модели временных рядов [9–12]. Их применение особенно естественно в тех случаях, когда пассажиропоток обладает выраженной инерционностью и периодичностью, а основную роль играют повторяющиеся колебания по часам суток, дням недели или сезонам. Поэтому в литературе широко используются ARIMA- и SARIMA-спецификации [12], различные процедуры сглаживания, а также методы, ориентированные на явное описание сезонной компоненты. Наряду с классическими статистическими моделями применяются и специальные способы аппроксимации периодических колебаний, включая разложение по рядам Фурье [13], а также активно используются нейросетевые модели [8].

Вместе с тем одного лишь учета внутренней временной структуры нередко оказывается недостаточно, поскольку на пассажиропоток существенное влияние оказывают внешние факторы: численность и размещение населения, концентрация рабочих мест, образовательных, торговых и сервисных функций, расстояние и время поездки между территориями, а также относительное положение точек отправления и прибытия в общей системе транспортных связей рассматриваемой территории. Эти факторы прежде всего определяют средний уровень и пространственное распределение пассажиропотоков, но обычно слабо изменяются в течение небольших промежутков времени (дней, недель). Существенную роль играют также характеристики транспортного предложения: частота сообщения, стоимость поездки, продолжительность и надежность перемещения, удобство пересадок, наличие конкурирующих видов транспорта. Они влияют не только на общий объем реализованных поездок, но и на распределение спроса между видами транспорта. К факторам краткосрочной изменчивости относятся календарные характеристики, погодные условия, недельная сезонность, а также различные нерегулярные события (массовые мероприятия, ремонты, сбои транспортной системы, ограничения движения и т. п.). Наконец, на более длительных горизонтах значимы социально-экономические и поведенческие факторы: уровень доходов, автомобилизация, режимы занятости, распространенность удаленной работы, изменения учебных и трудовых графиков.

С точки зрения краткосрочного суточного прогнозирования значимость указанных факторов неодинакова. Пространственно-демографические и транспортно-инфраструктурные характеристики задают устойчивый базовый уровень межмуниципальных корреспонденций,

тогда как ежедневные отклонения пассажиропотока в большей степени связаны с календарем, погодой и собственной временной структурой ряда. Такие факторы часто используются в качестве экзогенных переменных в моделях множественной регрессии, предназначенных для краткосрочного прогнозирования [12, 14–17]. Особое внимание в большинстве исследований уделяется погодным факторам. При этом результаты показывают, что сила и даже направление влияния одних и тех же метеорологических факторов могут заметно различаться в зависимости от пространственного распределения, структуры маршрута и характера поездок [15, 18].

Распространение автоматизированных систем оплаты проезда, смарт-карт и других цифровых источников, обеспечивающих получение больших данных, позволило перейти от агрегированных оценок к моделированию пассажиропотока на уровне отдельных остановок, маршрутов и коротких временных интервалов [15]. В этих условиях в исследованиях все чаще применяются методы машинного обучения [10, 18, 19], причем их преимущество связывается не только с более высокой точностью, но и со способностью учитывать пространственно-временную неоднородность спроса, особенно заметную при резких изменениях погодных условий. Во многих случаях улучшение качества прогноза достигается именно за счет совместного учета метеорологических переменных, календарных признаков и иных контекстных характеристик городской среды [16, 18].

Практически все исследования по краткосрочному прогнозированию пассажиропотоков ориентированы на транспорт общего пользования (обычно конкретный вид транспорта) и используют в качестве эмпирической базы число перевезенных пассажиров на маршруте,

загрузку подвижного состава, данные автоматизированного учета поездок и смарт-карт, результаты натурных обследований и т. п. То есть речь идет о реализованном объеме перевозок (спрос, который смогла удовлетворить существующая транспортная система). Между тем при дефиците провозной способности, перегрузке маршрутов или неудовлетворительном качестве обслуживания наблюдаемые объемы поездок могут не совпадать с полным фактическим спросом на поездки данным видом транспорта общего пользования (в таких случаях потенциальные пассажиры используют другие виды транспорта, карпулинг, личные автомобили и т. п.).

Следовательно, по изменению пассажиропотока на конкретном виде транспорта нельзя сделать однозначный вывод о причине этого изменения: оно может быть вызвано как изменением общего пассажиропотока, так и его перераспределением между разными видами транспорта. Поэтому при принятии управленческих решений прогноз перевозок отдельным видом транспорта целесообразно рассматривать в сочетании с прогнозом общего пассажиропотока всеми видами транспорта. Для того чтобы такой прогноз общего пассажиропотока имел необходимую для практического применения точность, могут быть использованы данные сотовых операторов, содержащие достаточно полную и точную информацию о перемещениях населения. Такое прогнозирование особенно важно для пригородных железнодорожных перевозок, поскольку позволяет учитывать не только фактически сложившийся спрос на железнодорожное сообщение, но и общий объем поездок, формирующий потенциальную базу его развития. При этом автору неизвестны исследования, посвященные прогнозированию краткосрочных изменений общего пассажиропотока.

Поэтому целью настоящей работы являются разработка и сравнительный анализ моделей краткосрочного прогнозирования общих суточных межмуниципальных пассажиропотоков в агломерации крупного города и определение подходов, обеспечивающих наибольшую точность прогноза. Для моделирования будут использоваться факторы формирования пассажиропотоков, которые изменяются на суточном горизонте, доступны для всего периода наблюдения и могут быть использованы в режиме оперативного прогнозирования (календарные признаки, погодные показатели и лаговые характеристики пассажиропотока). Эмпирической базой исследования являются данные сотовых операторов о количестве поездок населения в сутки между муниципальными образованиями Екатеринбургской агломерации за 2023 год.

Материалы и методы

Эмпирической основой исследования послужили данные сотовых операторов о межмуниципальных корреспонденциях в пределах Екатеринбургской агломерации, содержащиеся в региональной геоинформационной системе Свердловской области. Эти данные представляют собой количество поездок населения в сутки за каждый день 2023 года между 13 муниципальными образованиями, входящими в агломерацию Екатеринбурга (рис. 1).

Также в настоящей работе были использованы архивные суточные данные о погоде в Екатеринбурге (температура воздуха, влажность и скорость ветра)¹. По всем трем показателям при агрегации внутрисуточных наблюдений использовались суточные максимумы.

В исследовании применялись модели двух типов, различающиеся по способу

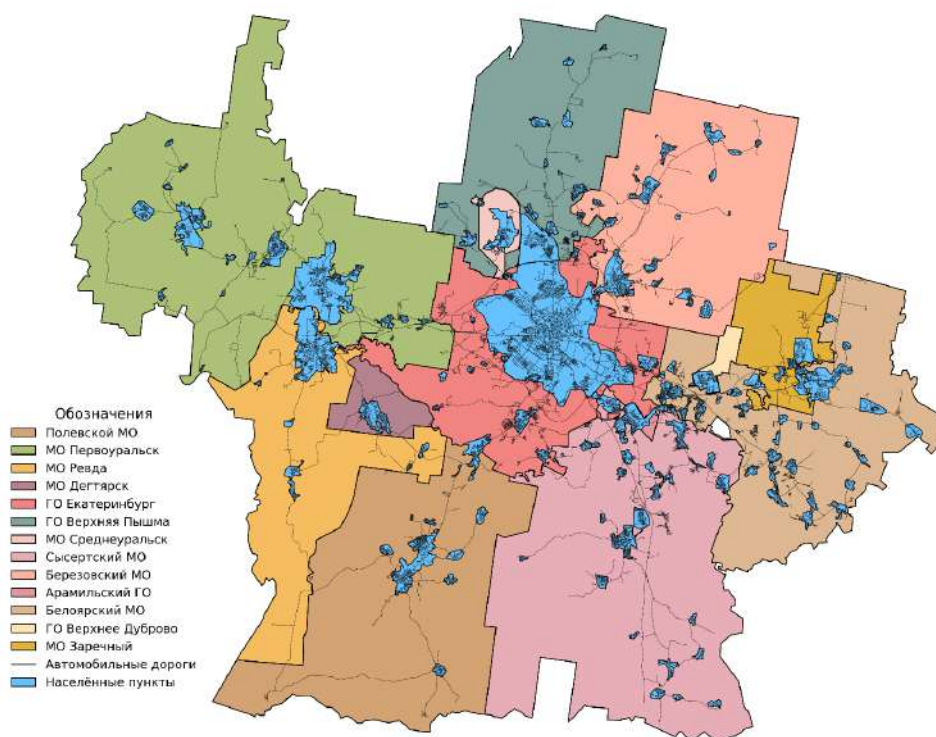


Рис. 1. Агломерация Екатеринбурга

¹ https://meteo9.ru/archive_v_ekaterinburge/te5X

использования данных и уровню агрегирования зависимостей. К первому типу относятся модели, калибруемые на панельных данных, то есть на единой выборке по всем корреспонденциям и дням наблюдения, ко второму типу — модели, калибруемые отдельно для каждой корреспонденции. Принципиальное различие между двумя типами моделей состоит в способе калибровки параметров. В моделях первого типа параметры калибруются на объединенной выборке и являются общими для всех корреспонденций, то есть такие модели подразумевают наличие единых закономерностей форми-

рования пассажиропотоков. В моделях второго типа параметры калибруются индивидуально для каждой корреспонденции и, следовательно, учитывают ее особенности.

В качестве базовых моделей прогнозирования использовались две наивные модели, основанные на предположении о сохранении ранее наблюдавшегося уровня пассажиропотока: прогноз по значению предыдущего дня («завтра как сегодня») и прогноз по значению аналогичного дня предыдущей недели («завтра как неделю назад»). Такие модели имеют важное методическое значение, поскольку задают

ГО Екатеринбург	-	20476	38142	44997	40122	5572	9470	17745	4018	9189	8311	3537	2907
МО Первоуральск	19020	-	450	288	419	5486	198	249	58	138	45	1337	18
ГО Верхняя Пышма	37885	474	-	2099	321	188	138	315	126	8808	118	56	41
Березовский МО	44157	260	2072	-	670	186	122	626	356	406	187	43	113
Сысертский МО	38970	428	322	747	-	107	350	3187	162	119	9270	50	243
МО Ревда	5100	5375	140	163	115	-	110	32	9	55	0	1282	12
Полевской МО	9104	196	119	144	295	100	-	121	9	205	58	516	16
Белоярский МО	18928	235	303	688	3483	46	113	-	6298	101	1649	95	2513
МО Заречный	3959	57	95	354	187	12	18	5939	-	18	53	0	350
МО Среднеуральск	7737	126	7534	289	77	46	142	77	31	-	0	28	24
Арамильский ГО	8360	54	99	188	10639	14	42	1669	58	14	-	24	192
МО Дегтярск	2635	1115	89	10	63	1048	444	40	0	15	16	-	0
ГО Верхнее Дуброво	2841	14	15	132	268	9	0	2337	366	10	207	0	-

Рис. 2. Матрица межмуниципальных корреспонденций Екатеринбургской агломерации на 15.06.2023

минимальный ориентир, с которым сопоставляются результаты более сложных подходов. Понятно, что указанные модели могут быть отнесены к обоим указанным типам, поскольку они не имеют калибруемых параметров.

На объемы корреспонденций существенно влияют календарные факторы (выходные, праздники, неравномерность в течение недели, сезонные изменения) и погодные (температура, влажность, сила ветра). Эти факторы могут быть включены в модель различными способами. Например, самый простой способ учета календарных особенностей — ввести одну переменную, которая будет принимать значение 1 для выходного (праздничного) дня и 0 для буднего дня. Для более полного извлечения информации можно ввести несколько переменных, которые для каждого дня будут не только определять, будним или выходным он является, но также его положение в группе подряд идущих будничных или выходных дней. Также можно учитывать день недели, различать выходные и праздничные дни и т. п. Аналогично для погоды можно использовать температуру, влажность и силу ветра как отдельные факторы или рассматривать эквивалентно-эффективную температуру (ЭЭТ), вычисляемую на их основе. Причем для вычисления ЭЭТ существуют различные формулы. Далее при описании каждой модели все используемые в ней календарные факторы для дня t будем обозначать через вектор $\bar{C}_t$, а погодные — через вектор $\bar{W}_t$.

Также далее будут использоваться следующие обозначения: T_{ijt} — количество поездок из МО i в МО j в день t ; P_i — численность населения МО i ; $D_{ij}^{(km)}$ — дамми-переменные, отражающие фиксированные различия между корреспонденциями ($D_{ij}^{(km)} = 1$ при $i = k$ и $j = m$, $D_{ij}^{(km)} = 0$ в противном случае); E — множество всех корреспонденций (i, j) , $i \neq j$

без одной из них (любой, но фиксированной); ε_{ijt} — случайная ошибка модели.

Для моделирования на панельных данных использовались линейная и логлинейная регрессии, а также регрессия Пуассона:

$$Y_{ijt} = \beta_0 + \beta_1 Y_{ij,t-l} + \beta_2 P_i + \beta_3 P_j + \bar{\mu} \bar{C}_t + \bar{\theta} \bar{W}_t + \sum_{(k,m) \in E} \gamma_{km} D_{ij}^{(km)} + \varepsilon_{ijt}, \quad (1)$$

где $\beta_0, \dots, \beta_3, \bar{\mu}, \bar{\theta}$,

γ_{km} — параметры;

l — размер лага.

Для линейной регрессии $Y_{ijt} = T_{ijt}$, $Y_{ij,t-l} = T_{ij,t-l}$, для логлинейной регрессии $Y_{ijt} = \ln T_{ijt}$, $Y_{ij,t-l} = \ln T_{ij,t-l}$, а для регрессии Пуассона $Y_{ijt} = \ln \lambda_{ijt}$, $Y_{ij,t-l} = \ln \lambda_{ij,t-l}$, где λ_{ijt} — математическое ожидание случайной величины T_{ijt} , относительно которой предполагается, что она имеет распределение Пуассона.

Необходимо отметить, что использование регрессии Пуассона является достаточно естественным в данной ситуации, поскольку зависимая переменная T_{ijt} принимает целые положительные значения (количество поездок).

Для моделирования на отдельных корреспонденциях также использовались линейная, логлинейная и пуассоновская регрессии вида:

$$Y_{ijt} = \beta_0^{(ij)} + \beta_1^{(ij)} Y_{ij,t-l} + \bar{\mu}^{(ij)} \bar{C}_t + \bar{\theta}^{(ij)} \bar{W}_t + \varepsilon_{ijt}, \quad (2)$$

где Y_{ijt} и $Y_{ij,t-l}$ такие же, как выше для соответствующих моделей;

$\beta_0^{(ij)}, \beta_1^{(ij)}, \bar{\mu}^{(ij)}, \bar{\theta}^{(ij)}$ — параметры (индивидуальные для каждой корреспонденции).

Кроме регрессионных моделей вида (2), в случае отдельных корреспонденций использовались модели временных рядов, не учитывающие экзогенных факторов. Речь идет о модели тройного экспоненциального сглаживания Хольта — Винтерса (HW) и сезонной авторегрессионной интегрированной модели скользящего среднего (SARIMA). Также

рассматривались комбинации линейных регрессий и моделей временных рядов (линейная регрессия с календарными и погодными факторами и остатками в форме HW или SARIMA).

Модель HW имеет вид:

$$T_{ijt} = a_{ijt,t-1} + b_{ijt,t-1} + s_{ijt,t-m} + \varepsilon_{ijt}, \quad (3)$$

$$a_{ijt} = \alpha_{ij}(T_{ijt} - s_{ijt,t-m}) + (1 - \alpha_{ij})(a_{ijt,t-1} + b_{ijt,t-1}), \quad (4)$$

$$b_{ijt} = \beta_{ij}(a_{ijt} - a_{ijt,t-1}) + (1 - \beta_{ij})b_{ijt,t-1}, \quad (5)$$

$$s_{ijt} = \gamma_{ij}(T_{ijt} - a_{ijt}) + (1 - \gamma_{ij})s_{ijt,t-m}, \quad (6)$$

где a_{ijt} — сглаженный уровень ряда;

b_{ijt} — трендовая компонента;

s_{ijt} — периодическая компонента;

m — длина периода;

$\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$ — параметры сглаживания;

ε_{ijt} — случайная ошибка.

Прогноз на один шаг вперед для данной модели определяется выражением

$$\hat{T}_{ijt,t+1} = a_{ijt} + b_{ijt} + s_{ijt,t+1-m}. \quad (7)$$

Модель SARIMA для ряда T_{ijt} может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi_{ij}(L^m)\varphi_{ij}(L)(1-L)^{d_{ij}}(1-L^m)^{D_{ij}}T_{ijt} = \\ = c_{ij} + \Theta_{ij}(L^m)\theta_{ij}(L)\varepsilon_{ijt}, \end{aligned} \quad (8)$$

где L — оператор лага;

$\varphi_{ij}(L)$ и $\theta_{ij}(L)$ — полиномы несезонной авторегрессионной и скользящей средней частей порядков p_{ij} и q_{ij} ;

$\Phi_{ij}(L^m)$ и $\Theta_{ij}(L^m)$ — полиномы сезонной авторегрессионной и сезонной скользящей средней частей порядков P_{ij} и Q_{ij} ;

d_{ij} и D_{ij} — порядки несезонного и сезонного дифференцирования;

m — длина сезонного периода;

c_{ij} — константа;

ε_{ijt} — случайная ошибка.

Модель, сочетающая линейную регрессию по календарным и погодным факторам с остатками, моделируемыми по HW, имеет вид:

$$T_{ijt} = \beta_0^{(ij)} + \bar{\mu}^{(ij)}\bar{C}_t + \bar{\theta}^{(ij)}\bar{W}_t + u_{ijt}, \quad (9)$$

где остаточная компонента u_{ijt} удовлетворяет соотношениям (3) – (6).

Линейная регрессия с остатками, моделируемыми по SARIMA, тоже имеет вид (9) с u_{ijt} , удовлетворяющими соотношению (8).

Калибровка параметров линейной регрессии осуществлялась методом наименьших квадратов (МНК) и методом наименьших модулей (МНМ), логлинейная регрессия калибровалась по МНК, регрессия Пуассона — по методу максимального правдоподобия (ММП). Для HW параметры сглаживания уровня, тренда и сезонной компоненты определялись по МНК (минимизировалась сумма квадратов одношаговых ошибок прогноза). Для модели SARIMA выбор структуры осуществлялся по информационному критерию Акаике (порядки несезонной и сезонной авторегрессионной и скользящей средней частей, а также порядки несезонного и сезонного дифференцирования), после чего калибровка коэффициентов выполнялась по ММП. Комбинированные модели вида (9) калибровались поэтапно: на первом этапе оценивались параметры линейной регрессии, а на втором этапе на остатках регрессионной модели — параметры HW и SARIMA.

Реализация указанных методов была выполнена средствами библиотеки statsmodels языка Python. Для МНК использовалась функция OLS. МНМ был реализован на основе итеративной схемы перевзвешенных наименьших квадратов IRLS (Iteratively Reweighted Least Squares). В рамках данной процедуры задача минимизации суммы модулей заменялась последовательностью задач взвешенного метода наименьших квадратов (веса наблюдений

задавались как функция абсолютных остатков) с использованием функций OLS и WLS. Для логлинейной регрессии применялась функция OLS после логарифмического преобразования зависимой переменной, для регрессии Пуассона — GLM с семейством Poisson. Модель Хольта — Винтерса оценивалась с помощью класса ExponentialSmoothing, а модели SARIMA — с помощью класса SARIMAX, при этом выбор порядков осуществлялся перебором по AIC, а калибровка коэффициентов — методом максимального правдоподобия. В комбинированных моделях сначала оценивалась регрессионная компонента, после чего остатки моделировались средствами ExponentialSmoothing или SARIMAX.

Результаты и обсуждение

Обучение и тестирование всех моделей осуществлялось по схеме расширяющейся обучающей выборки и одношагового прогнозирования. В качестве первоначальной обучающей выборки использовались данные за первые 60 дней рассматриваемого периода. Начиная с 61-го дня для каждой последующей даты модель калибровалась по всем наблюдениям, накопленным к данному моменту, после чего формировался прогноз на одни следующие сутки. Затем в обучающую выборку добавлялось новое фактическое наблюдение, и процедура повторялась до конца года. Такой подход соответствует реальной практике прогнозирования пассажиропотоков, поскольку в прикладных задачах прогноз, как правило, строится на основе всей доступной на текущий момент информации и ориентирован на ближайший день. В результате для каждой модели и для каждой корреспонденции было получено 305 прогнозных значений.

Для оценки качества прогнозов использовались несколько взаимодополняющих метрик:

- средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i,j,t} |T_{ijt} - \hat{T}_{ijt}|,$$

- коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i,j,t} (T_{ijt} - \hat{T}_{ijt})^2}{\sum_{i,j,t} (T_{ijt} - \bar{T})^2},$$

- средняя относительная симметричная погрешность:

$$sMAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i,j,t} \frac{2|T_{ijt} - \hat{T}_{ijt}|}{|T_{ijt}| + |\hat{T}_{ijt}|},$$

где $\hat{T}_{ijt}$ — прогнозное значение;

$N = 156 \times 305$ — общее число прогнозных значений;

$\bar{T}$ — среднее наблюдаемое значение потока по всем рассматриваемым наблюдениям.

Также для каждой модели определялась доля наблюдаемого пассажиропотока, предсказанного с относительной ошибкой не более 10, 5 и 1 %. Сначала для каждого наблюдения рассчитывалась относительная ошибка:

$$\delta_{ijt} = \frac{|T_{ijt} - \hat{T}_{ijt}|}{T_{ijt}}, \quad T_{ijt} > 0,$$

после чего для заданного порога $\alpha \in \{0,10; 0,05\}$ вычислялся показатель:

$$A_\alpha = 100\% \cdot \frac{\sum_{i,j,t} T_{ijt} \cdot I(\delta_{ijt} \leq \alpha)}{\sum_{i,j,t} T_{ijt}},$$

где $I(\delta_{ijt} \leq \alpha)$ — индикаторная функция.

Отметим, что показатели A_α часто используют в процессе принятия управленческих решений, поскольку в прикладных задачах транспортного планирования важна не только средняя величина ошибки, но и то, какая часть реального пассажиропотока прогнозируется с приемлемой точностью.

Обычно в требованиях к качеству прогноза фигурирует порог 10 %. Именно такой уровень отклонения во многих случаях считается практически допустимым при обосновании управленческих решений, планировании транспортной работы и оценке ожидаемой нагрузки на сеть.

При формировании вектора календарных факторов $\bar{C}_i$ были использованы несколько различных подходов. В частности, рассматривались варианты с различной степенью детализации недельного цикла — от простого разделения дней на рабочие и нерабочие до полного набора фиктивных переменных по дням недели. Также оценивалась целесообразность явного учета праздничной компоненты через индикаторы официальных праздничных дней, предпраздничных и послепраздничных суток, удлиненных выходных периодов. Кроме этого, использовались наборы переменных, отражающие более медленные календарные колебания, включая месячные и сезонные фиктивные переменные, признаки начала и конца месяца, индикаторы школьных каникул и летнего отпускного периода.

Сравнение указанных спецификаций показало, что увеличение числа компонент вектора $\bar{C}_i$ не обеспечивало повышения качества прогноза. Почти для всех рассмотренных моделей расширение набора календарных факторов приводило к ухудшению результатов прогноза вне обучающей выборки (происходило переобучение модели). Наилучшие показатели метрик качества были получены, когда для $\bar{C}_i$ использовались две компоненты:

- 1) $\bar{C}_i^1$ принимает значение 1 для выходных и праздничных дней и 0 для всех остальных;
- 2) $\bar{C}_i^2$ принимает значение 1 для рабочего дня, непосредственно предшествующего выходному или праздничному дню либо следующего за ним, и 0 во всех остальных случаях.

В качестве возможных компонент вектора погодных факторов $\bar{W}_i$ рассматривались непосредственно температура, влажность, скорость ветра, а также агрегированные показатели эффективной температуры (ЭТ) и эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ), которые широко используются для характеристики влияния погодных факторов на человека [19]:

$$\text{ЭТ} = t - 0.4(t - 10) \left(1 - \frac{f}{100} \right),$$

$$\begin{aligned} \text{ЭЭТ} = 37 - \frac{37 - t}{0.68 - 0.0014f + \frac{1}{11.76 + 1.4v^{0.75}}} - \\ - 0.29t \left(1 - \frac{f}{100} \right). \end{aligned}$$

Влияние указанных погодных факторов на количество поездок представлено в табл. 1.

Из этой таблицы следует, что в качестве погодных факторов $\bar{W}_i$ целесообразно использовать температуру воздуха (W_i^1) и скорость ветра (W_i^2), поскольку ЭТ и ЭЭТ фактически дублируют температуру, а влажность имеет почти нулевой коэффициент корреляции с количеством поездок. Такой выбор полностью подтверждается сравнением показателей качества прогноза. Для всех рассматриваемых моделей включение влажности или замена температуры на ЭЭТ (ЭТ) приводили к незначительному снижению показателей.

Значение лага l в моделях (1) и (2) определялось на основе анализа автокорреляционной структуры временного ряда поездок (рис. 3) и последующего сравнения прогностического качества моделей. По графику автокорреляционной функции видно, что наиболее подходящими являются $l = 1$ и $l = 7$. При этом оказалось, что для всех моделей (1) качество прогноза лучше при $l = 7$, а для всех моделей (2) — при $l = 1$.

ТАБЛИЦА 1. Коэффициенты корреляции для погодных факторов и общего количества межмуниципальных поездок в агломерации Екатеринбурга

	Поездки	Температура	Ветер	Влажность	ЭТ	ЭЭТ
Поездки	1,00	0,83	−0,22	−0,08	0,82	0,82
Температура	0,83	1,00	−0,20	−0,18	1,00	0,99
Ветер	−0,22	−0,20	1,00	−0,17	−0,20	−0,29
Влажность	−0,08	−0,18	−0,17	1,00	−0,17	−0,18
ЭТ	0,82	1,00	−0,20	−0,17	1,00	0,99
ЭЭТ	0,82	0,99	−0,29	−0,18	0,99	1,00

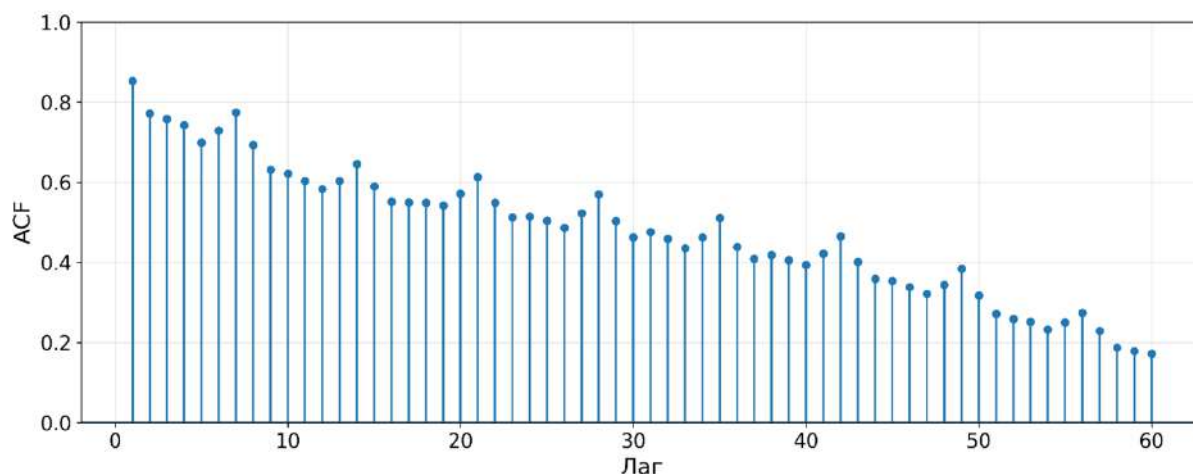


Рис. 3. Автокорреляционная функция общего количества межмуниципальных поездок в агломерации Екатеринбурга на 15.06.2023

Сезонный период m в моделях (3)–(9) задавался исходя из автокорреляционной структуры временного ряда поездок. Хорошо известная недельная периодичность суточных пассажиропотоков подтверждается пиками автокорреляционной функции на лагах, кратных семи. Поэтому было выбрано $m = 7$.

Результаты расчета метрик качества прогноза для всех рассматриваемых моделей представлены в табл. 2 (в качестве календарных и погодных факторов использовались C_t^1 , C_t^2 , W_t^1 , W_t^2).

Как видно из табл. 2, качество прогноза в целом возрастает по мере усложнения мо-

делей. Для линейной регрессии (1) использование МНМ дает заметно лучшие результаты по сравнению с МНК: MAE снижается с 263,6 до 233,4, а sMAPE — с 63,6 до 25,8. Регрессия Пуассона для моделей первого типа дает еще лучшие результаты (MAE = 219,7, sMAPE = 22,4), тогда как логлинейная модель, напротив, оказывается существенно хуже не только других регрессий, но и обеих наивных моделей. Это означает, что для панельных данных модели (1) более устойчивое оценивание МНМ и пуассоновская регрессия оказываются предпочтительнее линейной и логлинейной моделей.

ТАБЛИЦА 2. Показатели качества прогноза моделей

Модель	MAE	R2	sMAPE	A _{0,1}	A _{0,05}
Наивная модель «завтра как сегодня»	268,5	0,99	27,7	67,2	44,1
Наивная модель «завтра как неделю назад»	249,8	0,99	27,9	69,9	44,1
Линейная регрессия (1), МНК, лаг	263,6	0,99	63,6	72,3	45,7
Линейная регрессия (1), МНМ, лаг	233,4	0,99	25,8	72,4	45,5
Логлинейная регрессия (1), лаг	440,4	0,96	25,3	43,7	23
Регрессия Пуассона (1), лаг	219,7	0,99	22,4	74,5	47,2
Линейная регрессия (2), МНК, лаг	198,1	0,99	21,2	79	52,3
Линейная регрессия (2), МНМ, лаг	203,7	0,99	22,4	77,9	51,8
Логлинейная регрессия (2), лаг	197,2	0,99	21,4	79,0	52,4
Регрессия Пуассона (2), лаг	197,0	0,99	21,0	78,9	52,4
Модель Хольта — Винтерса (3)–(6)	180,4	0,99	20,1	82,6	56,3
SARIMA (8)	185,8	0,99	20,3	81,4	54,7
Линейная регрессия + HW (9)	171,3	0,99	20,2	84,1	56,7
Линейная регрессия + SARIMA (9)	169,2	0,99	20,1	84,3	58,1

Для моделей (2) различия между способами оценивания уже существенно меньше. Линейная регрессия, оцененная МНК, даже немного превосходит МНМ, а логлинейная и пуассоновская модели дают практически одинаковые результаты. По-видимому, это связано с тем, что на объединенных панельных данных сильнее проявляются гетероскедастичность и выбросы, тогда как временные ряды по отдельным корреспонденциям являются более однородными, вследствие чего МНМ и регрессия Пуассона в моделях (2) уже не дают заметных преимуществ. В целом все модели (2) превосходят модели (1). Это означает, что различия между корреспонденциями связаны не только с разными средними уровнями потоков, которые могут быть учтены дамми-переменными, но и с различием самих зависимостей между пассажиропотоком, календарны-

ми факторами, погодой и предшествующими значениями ряда.

Наилучшие результаты показывают модели временных рядов и особенно комбинированные модели. Лучшей по совокупности показателей является модель «линейная регрессия + SARIMA», однако линейная регрессия + HW имеет практически такое же качество прогноза: значения MAE составляют 169,2 и 171,3 соответственно, sMAPE — 20,1 и 20,2, а показатели A_α также различаются незначительно. По-видимому, преимущество этих моделей связано с тем, что они одновременно учитывают две разные составляющие динамики пассажиропотока. Регрессионная часть описывает влияние календарных и погодных факторов, тогда как модель Хольта — Винтерса или SARIMA дополнительно улавливает сохраняющуюся в остатках временную зависимость,

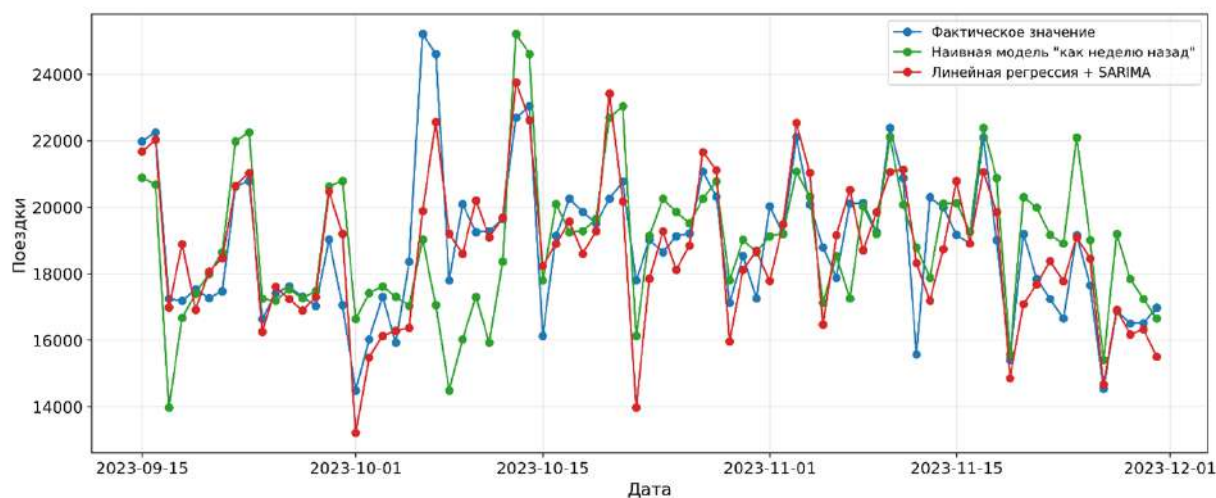


Рис. 4. Результаты прогнозирования с помощью наивной модели и модели «линейная регрессия + SARIMA».

прежде всего недельную сезонность и краткосрочную инерционность ряда. Визуализация полученных прогнозных значений по модели «линейная регрессия + SARIMA» представлена на рис. 4.

Следует отметить, что коэффициент детерминации R^2 почти для всех моделей принимает очень высокие и близкие значения (только у логлинейной регрессии (1) он несколько ниже). По-видимому, это связано с тем, что в рассматриваемых данных общая вариация пассажиропотока очень велика вследствие существенных различий между корреспонденциями, а также выраженной недельной периодичности. Тогда как ошибки одношагового прогноза для большинства моделей относительно этой общей вариации оказываются значительно меньше, поэтому здесь показатель R^2 практически не позволяет различать модели по качеству прогноза.

Выводы

1. Динамика общих суточных межмуниципальных пассажиропотоков в агломерации

определяется сочетанием календарных и погодных воздействий, а также собственной временной структурой рядов, прежде всего недельной периодичностью.

2. Более высокое качество прогноза обеспечивают модели, калибруемые отдельно по каждой корреспонденции, тогда как модели на объединенных панельных данных дают в среднем более слабые результаты. Наилучшие показатели продемонстрировали комбинированные модели, прежде всего линейная регрессия + SARIMA. Близкое качество показала и модель «линейная регрессия + HW». Это свидетельствует о целесообразности совместного учета календарно-погодных факторов и внутренней временной структуры пассажиропотока.

3. Практическое значение полученных результатов состоит в возможности использования таких прогнозов при решении задач оперативного управления транспортной системой агломерации, включая оценку ожидаемой нагрузки на межмуниципальные связи и обоснование параметров транспортного обслуживания. В частности, такие оценки могут быть

полезны при анализе и планировании пригородных железнодорожных перевозок.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР УрГУПС.

Список источников

1. Аземша С. А., Янкович С. Ю. Повышение эффективности пассажирских перевозок городским транспортом регулярного сообщения с учетом колебаний пассажиропотока // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Транспорт. 2023. № 1. С. 65–70.

2. Матвеев А. Г., Менухова Т. А. Метод экстраполяции пассажиропотоков по геолокации мобильных устройств на городском пассажирском транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (65). С. 29–39. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_65_29

3. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G. Modelling Transport. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 606 p.

4. Бушуев Н. С., Шульман Д. О., Сагайдак К. М. Анализ динамики пассажиропотока поездов «Сапсан» и авиационного транспорта на линии Москва — Санкт-Петербург до 2025 года // Бюллетень результатов научных исследований. 2019. № 1. С. 5–14.

5. Янков К. В., Лавриненко П. А., Фадеев М. С. Опыт прогнозирования пассажиропотоков и социально экономических эффектов при ускорении железнодорожного сообщения в Самаро-Тольяттинской агломерации // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2016. № 1. С. 622–647.

6. Оспанов Д. Т., Намиот Д. Е., Покусаев О. Н. Структурно-временной анализ пассажиропотока метрополитена // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11, no. 6. Pp. 118–126.

7. Identifying, Analyzing, and Forecasting Commuting Patterns in Urban Public Transportation: A Re-

view / J. Xiong [et al.] // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 249. Art. № 123646. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123646

8. Machine Learning for Public Transportation Demand Prediction: A Systematic Literature Review / F. R. Torrepadula [et al.] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Vol. 137. Art. № 109166. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109166

9. Краткосрочное прогнозирование пассажиропотоков на основе статистических данных / В. В. Нефедов [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2013. № 6. С. 95–99.

10. Якимов М. А., Операйло К. В., Новикова Е. Н. Сравнительное тестирование моделей ARIMA и LSTM в задачах прогнозирования пассажиропотока // Символ науки. 2022. № 6-2. С. 29–33.

11. Wei Y., Chen M.-C. Forecasting the Short-Term Metro Passenger Flow with Empirical Mode Decomposition and Neural Networks // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. 2012. Vol. 21, no. 1. Pp. 148–162. DOI: 10.1016/j.trc.2011.06.009

12. To Travel or Not to Travel: “Weather” is the Question. Modelling the Effect of Local Weather Conditions on Bus Ridership / S. Tao [et al.] // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2018. Vol. 86. Pp. 147–167.

13. Смирнов С. С. Применение рядов Фурье для прогнозирования объемов перевозок пассажиров в пригородном сообщении // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, вып. 3. С. 616–624.

14. Impacts of Weather on Public Transport Ridership: Results from Mining Data from Different Sources / M. Zhou [et al.] // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2017. Vol. 75. Pp. 17–29.

15. Analysing the Impact of Weather on Bus Ridership Using Smart Card Data / L. Li [et al.] // IET Intelligent Transport Systems. 2015. Vol. 9, no. 2. Pp. 221–229. DOI: 10.1049/iet-its.2014.0062

16. Deep Learning Approach for Predicting Bus Passenger Demand Based on Weather Conditions / T. Fontes [et al.] // *Transport and Telecommunication*. 2020. Vol. 21, no. 4. Pp. 255–264. DOI: 10.2478/ttj-2020-0020

17. Arana P., Cabezudo S., Peñalba M. Influence of Weather Conditions on Transit Ridership: A Statistical Study Using Data from Smartcards // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2014. Vol. 59. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.tra.2013.10.019

18. Rowe F., Mahony M., Tao S. Assessing Machine Learning Algorithms for Near-Real Time Bus Ridership Prediction During Extreme Weather. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2204.09792

19. Дьячкова В. В., Свербиненко А. В. Нейросетевая модель прогнозирования пассажиропотока

для железнодорожного транспорта // *Экономический вестник ДонГТУ*. 2025. № 22. С. 57–65.

20. Калинин Н. А., Ветров А. Л. Особенности изменений индексов комфортности климата в Перми и городах-миллионниках Сибири в холодный и теплый периоды года // *Географический вестник*. 2024. № 3 (70). С. 83–94.

Дата поступления: 20.03.2026

Решение о публикации: 22.06.2026

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Александр Валериевич — кандидат физ.-мат. наук, доцент, руководитель научно-исследовательской лаборатории «Транспортное моделирование»; amartynenko@rambler.ru

Forecasting Daily Changes in Passenger Flows in a Large Urban Agglomeration Based on Mobile Operator Data

A. V. Martynenko

Ural State University of Railway Transport, 66 Kolmogorov st., Yekaterinburg, 620034, Russia

For citation: *Martynenko A. V. Forecasting Daily Changes in Passenger Flows in a Large Urban Agglomeration Based on Mobile Operator Data // Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 727–742. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-727-742 (In Russian)

Abstract

Purpose: to develop and comparatively analyze models for short-term forecasting of total daily intermunicipal passenger flows in a large urban agglomeration based on mobile operator data and to identify the approaches providing the highest forecast accuracy. **Methods:** linear, log-linear, and Poisson regressions, the Holt — Winters model, SARIMA, and hybrid models combining a regression component with time-series models. Forecast accuracy was assessed using MAE, R², and sMAPE. **Results:** it was found that the dynamics of total intermunicipal passenger flows are determined by a combination of calendar and weather factors, as well as pronounced weekly seasonality and short-term inertia. Models calibrated separately for each origin–destination pair were shown to provide higher forecast accuracy than models estimated on pooled panel data. The best results were obtained for the hybrid models “linear regression + HW” and “linear regression + SARIMA”. It was also established that excessive detailing of calendar factors does not improve forecast accuracy. **Practical significance:** the results obtained can be used in solving problems of operational management of an agglomeration transport system, including the assessment of the expected load on intermunicipal connections and the substantiation of transport service parameters. Forecasting total passenger flows based on mobile operator data makes it possible to complement forecasts for individual transport modes with an assessment of aggregate travel demand. This is of particular interest for the analysis and planning of suburban rail transportation.

Keywords: transport modeling, passenger flows, intermunicipal origin–destination flows, short-term forecasting, mobile operator data, Yekaterinburg agglomeration, time series, SARIMA, Holt — Winters model, suburban rail transportation

References

1. Azemsha S. A., Yankovich S. Yu. Povyshenie effektivnosti passazhirskikh perevozok gorodskim transportom regul'yarnogo soobshcheniya s uchetom kolebaniy passazhiropotoka [Improving the Efficiency of Passenger Transportation by Regular Urban Transport Considering Passenger Flow Fluctuations], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Transport [Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences. Transport]*, 2023, no. 1, pp. 65–70. (In Russian)
2. Matveev A. G., Menukhova T. A. Metod ekstrapolyatsii passazhiropotokov po geolokatsii mobilnykh ustroystv na gorodskom passazhirskom transporte [A Method for Extrapolating Passenger Flows Based on Mobile Device Geolocation in Urban Passenger Transport], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of Siberian State University of Communications]*, 2023, no. 2 (65), pp. 29–39. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_65_29 (In Russian)
3. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G. Modelling Transport. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 606 p.
4. Bushuev N. S., Shulman D. O., Sagaydak K. M. Analiz dinamiki passazhiropotoka poezdov “Sapsan” i aviatsionnogo transporta na linii Moskva — Sankt-Peterburg do 2025 goda [Analysis of Passenger Flow Dynamics for Sapsan Trains and Air Transport on the Moscow — Saint Petersburg Line Until 2025], *Byulleten' rezultatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Research Results]*, 2019, no. 1, pp. 5–14. (In Russian)
5. Yankov K. V., Lavrinenko P. A., Fadeev M. S. Opyt prognozirovaniya passazhiropotokov i sotsialno ekonomicheskikh effektiv pri uskorenii zheleznodorozhnogo soobshcheniya v Samaro-Tolyattinskoy aglomeratsii [Experience in Forecasting Passenger Flows and Socio Economic Effects When Accelerating Railway Services in the Samara — Togliatti Agglomeration], *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN [Scientific Papers: Institute of Economic Forecasting, RAS]*, 2016, no. 1, pp. 622–647. (In Russian)
6. Ospanov D. T., Namiot D. E., Pokusaev O. N. Strukturno vremennoy analiz passazhiropotoka metropolitena [Structural Temporal Analysis of Metro Passenger Flow], *International Journal of Open Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 6, pp. 118–126. (In Russian)
7. Xiong J., et al. Identifying, Analyzing, and Forecasting Commuting Patterns in Urban Public Transportation: A Review, *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 249, art. no. 123646. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123646
8. Torrepadula F. R., et al. Machine Learning for Public Transportation Demand Prediction: A Systematic Literature Review, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, vol. 137, art. no. 109166. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109166
9. Nefedov V. V., et al. Kratkosrochnoe prognozirovanie passazhiropotokov na osnove statisticheskikh dannyykh [Short Term Forecasting of Passenger Flows Based on Statistical Data], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Universities. North Caucasus Region. Technical Sciences]*, 2013, no. 6, pp. 95–99. (In Russian)
10. Yakimov M. A., Operaylo K. V., Novikova E. N. Sravnitelnoe testirovanie modeley ARIMA i LSTM v zadachakh prognozirovaniya passazhiropotoka [Comparative Testing of ARIMA and LSTM Models in Passenger Flow Forecasting Tasks], *Simvol nauki [Symbol of Science]*, 2022, no. 6-2, pp. 29–33. (In Russian)

11. Wei Y., Chen M.-C. Forecasting the Short-Term Metro Passenger Flow with Empirical Mode Decomposition and Neural Networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 148–162. DOI: 10.1016/j.trc.2011.06.009
12. Tao S., et al. To Travel or Not to Travel: “Weather” is the Question. Modelling the Effect of Local Weather Conditions on Bus Ridership, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, vol. 86, pp. 147–167.
13. Smirnov S. S. Primenenie ryadov Furie dlya prognozirovaniya obemov perevozok passazhirov v prigorodnom soobshchenii [Applying Fourier Series to Forecast Passenger Volumes in Suburban Transport], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 616–624. (In Russian)
14. Zhou M., et al. Impacts of Weather on Public Transport Ridership: Results from Mining Data from Different Sources, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, vol. 75, pp. 17–29.
15. Li L., et al. Analysing the Impact of Weather on Bus Ridership Using Smart Card Data, *IET Intelligent Transport Systems*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 221–229. DOI: 10.1049/iet-its.2014.0062
16. Fontes T., et al. Deep Learning Approach for Predicting Bus Passenger Demand Based on Weather Conditions, *Transport and Telecommunication*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 255–264. DOI: 10.2478/ttj-2020-0020
17. Arana P., Cabezudo S., Peñalba M. Influence of Weather Conditions on Transit Ridership: A Statistical Study Using Data from Smartcards. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2014. Vol. 59, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.tra.2013.10.019
18. Rowe F., Mahony M., Tao S. Assessing Machine Learning Algorithms for Near-Real Time Bus Ridership Prediction During Extreme Weather. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2204.09792
19. Dyachkova V. V., Sverbinenko A.V. Neyrosetevaya model' prognozirovaniya passazhiropotoka dlya zheleznodorozhnogo transporta [Neural Network Model for Forecasting Passenger Flow in Railway Transport], *Ekonomicheskiy vestnik DonGTU [Economic Bulletin of DonSTU]*, 2025, no. 22, pp. 57–65. (In Russian)
20. Kalinin N. A., Vetrov A. L. Osobennosti izmeneniy indeksov komfortnosti klimata v Permi i gorodakh millionnikakh Sibiri v kholodnyy i teplyy periody goda [Features of Changes in Climate Comfort Indices in Perm and Siberian Million Population Cities During Cold and Warm Seasons], *Geograficheskiy vestnik [Geographical Bulletin]*, 2024, no. 3 (70), pp. 83–94. (In Russian)

Received: March 20, 2026

Accepted: June 22, 2026

Author's information:

Alexander V. MARTYNENKO — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the “Transport Modeling” Research Laboratory; amartynenko@rambler.ru

УДК 625.7

Модифицированные композиты на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений

Д. М. Рябых¹, С. В. Ключев^{1, 2}, А. В. Ключев², Н. А. Слободчикова^{1, 3}

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Россия, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64,

² Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Для цитирования: Рябых Д. М., Ключев С. В., Ключев А. В., Слободчикова Н. А. Модифицированные композиты на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 743–753. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-743-753

Аннотация

Цель: разработка составов модифицированных композитов на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений. В мировой практике имеется большое количество исследований применения различных видов отходов для укрепления и стабилизации грунтов. Наиболее интересными с точки зрения крупнотоннажного использования в земляных сооружениях являются золошлаковые отходы от сжигания угля и карбидный ил. **Методы:** формирование матрицы планирования эксперимента. Проведение эксперимента, в который входят определение характеристик исходных материалов, изготовление образцов с различным содержанием вяжущих, выдерживание образцов и определение качественных характеристик. Анализ полученных результатов. **Результаты:** исследованная проба золошлаковой смеси является техногенным пылеватым песком. По модулю основности золошлаковая смесь является сверхкислой. По минеральному составу к основным компонентам золошлаковой смеси относятся кварц и полевой шпат. Карбидный ил содержит значительное количество активного гидроксида кальция, который может реагировать с углекислым газом, образуя карбонат кальция. По результатам выполненной работы определены свойства исходных компонентов и разработаны составы золошлаковой смеси, укрепленной вяжущим на основе карбидного ила и портландцемента. Определена зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной карбидным илом, от содержания карбидного ила. **Практическая значимость:** разработанные составы можно использовать для строительства дополнительного слоя основания дорожной одежды и слоев земляного полотна автомобильных дорог низких технических категорий, подстилающих слоев и оснований под полы.

Ключевые слова: зологрунтовые смеси, золошлаковые смеси, золошлаковые смеси, укрепленные карбидным илом и портландцементом, грунты

Введение

В мире ежегодно наблюдается рост накопления техногенных отходов. Многие виды отходов можно эффективно применять для возведения земляных сооружений. Наиболее интересными с точки зрения крупнотоннажного использования в земляных сооружениях являются золошлаковые отходы от сжигания угля и карбидный ил.

Золошлаковые отходы тепловых электростанций — это твердые продукты сгорания углей, образующиеся в результате термообработки исходной минеральной части топлив.

В работах [1–10] приведены исследования результатов применения:

- золы уноса в качестве стабилизаторов или компонентов стабилизаторов глинистых грунтов;
- золы уноса в сочетании с золой гидроудаления в составах композиций для засыпки горных выработок;
- золы уноса бурого угля в сочетании с твердыми биологическими отходами для использования в качестве дорожного покрытия;
- шлака, образующегося при сжигании угля;
- золы в смеси с опилками для стабилизации грунтов.

Наибольший интерес представляют золошлаковые смеси, так как они являются основным видом отходов, накопленным в золоотвалах Российской Федерации.

Карбидный ил представляет собой многотоннажный порошкообразный известьсодержащий отход, образующийся в результате переработки карбида кальция CaC_2 в ацетилен C_2H_2 . По разным оценкам, ежегодно образуется от 18 до 70 млн л карбидного ила [11].

В работах [12–14] доказана эффективность использования карбидного шлама в качестве активной добавки. Внесение карбидного шлама

в глинистый грунт повышает прочность, водостойкость и морозостойкость грунта. Применение вяжущего вещества на основе карбидного ила значительно повышает удельное сцепление и снижает влажность грунта, что делает его пригодным для использования в строительстве автомобильных дорог.

Исследования совместного применения золошлаковых смесей и карбидного ила в земляных сооружениях практически отсутствуют. В связи с чем в работе поставлена цель — разработка составов модифицированных композитов на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений.

Материалы и методы

Для разработки композитов применены следующие материалы: карбидный ил (рис. 1), золошлаковая смесь (рис. 2), портландцемент, вода.

Для определения физико-механических свойств грунтов и золошлаковых смесей использованы стандартные методы лабораторных испытаний ГОСТ.

Разработка составов композитов сводится к следующей последовательности:

1. Определение переменных.

Независимые переменные (факторы): количество карбидного ила (%), количество портландцемента (%), количество воды (%).

Зависимые переменные: прочность на сжатие (кг/см^2), водостойкость, морозостойкость.

2. Выбор типа экспериментального плана. Для достижения поставленной в работе цели для исследования взаимодействия всех факторов выбран полный факторный эксперимент.

3. Формирование матрицы планирования эксперимента (табл. 1).

4. Проведение эксперимента. Каждый опыт проводится согласно плану.



Рис. 1. Карбидный ил



Рис. 2. Золошлаковая смесь

• Изготовление образцов (проведено с использованием стандартных методов ГОСТ 23558–94).

• Выдерживание образцов. Твердение изготовленных образцов осуществлялось в нормальных условиях при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$ (рис. 3).

• Определение прочностных характеристик полученных композитов. Для анализа результа-

тов набора прочности использованы значения прочности на сжатие. Определение прочности на сжатие выполнено на гидравлическом прессе с предварительным насыщением образцов водой (рис. 4).

• Исследование фазового состава. Рентгенофазовый анализ позволяет оценить физико-химическое состояние укрепленного грунта. Исследование выполнено методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре.

ТАБЛИЦА 1. Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Грунт	Карбидный ил, %	Портландцемент, %	Вода, %	Проектный возраст, сут.
1	Золошлаковая смесь	—	4	$W_{\text{опт}}$	28
2		—	6	$W_{\text{опт}}$	28
3		—	8	$W_{\text{опт}}$	28
4		9	1	$W_{\text{опт}}$	56
5		9	2	$W_{\text{опт}}$	56
6		9	3	$W_{\text{опт}}$	56
7		10	—	$W_{\text{опт}}$	56
8		12	—	$W_{\text{опт}}$	56
9		16	—	$W_{\text{опт}}$	56

Примечание: $W_{\text{опт}}$ — значение оптимальной влажности, %.



Рис. 3. Хранение образцов в камере нормального твердения

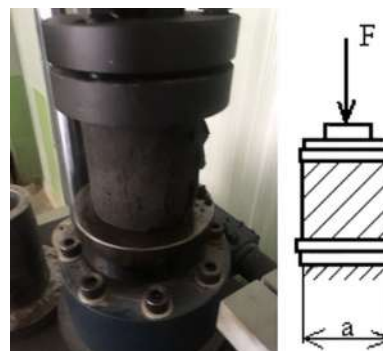


Рис. 4. Определение прочности на сжатие

Результаты

По результатам выполненных лабораторных исследований получены физико-механические характеристики золошлаковой смеси (табл. 2

и 3) и выполнена ее классификация согласно ГОСТ 25100-2020.

Химический состав золошлаковой смеси приведен в табл. 4.

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрический состав золошлаковой смеси

	Размер сит, мм							
	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Полные остатки, %	0,27	0,55	0,86	1,19	1,73	6,85	47,35	100,00

ТАБЛИЦА 3. Физико-механические характеристики золошлаковой смеси

Наименование показателя	Ед. изм.	Результаты испытаний
Естественная влажность грунта	%	16,94
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	0,86
Влажность на границе текучести	%	—
Влажность на границе раскатывания	%	не раскат. в жгут диаметром 3 мм
Число пластичности	%	—
Показатель текучести	д. е.	—
Разновидность грунта	—	песок пылеватый
Максимальная плотность	г/см ³	1,03
Оптимальная влажность	%	10,34
Потеря массы при прокаливании	%	5,6

ТАБЛИЦА 4. Химический состав пробы золошлаковой смеси

Наименование		Содержание, %	Модуль основности
Оксид алюминия	Al ₂ O ₃	28,8	$M_0 = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3} =$ $= \frac{8,06}{79,2} = 0,1$
Оксид железа	Fe ₂ O ₃	12,5	
Оксид кремния	SiO ₂	50,4	
Триоксид серы	SO ₃	0,92	
Оксид титана	TiO ₂	0,77	
Оксид магния	MgO	1,3	
Оксид кальция	CaO	5,8	
Оксид калия	K ₂ O	0,8	
Оксид натрия	Na ₂ O	0,16	
Оксид марганца	MnO ₂	0,11	
Оксид фосфора	P ₂ O ₃	0,12	

ТАБЛИЦА 5. Количественный фазовый анализ золошлаковой смеси

Наименование	Формула	Содержание, %
Кварц	SiO ₂	20,9
Муллит 3:2	от 3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ до 2Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	57,2
Полевой шпат (альбит)	Na(AlSi ₃ O ₈)	21,9
Неопределенные	–	4,4

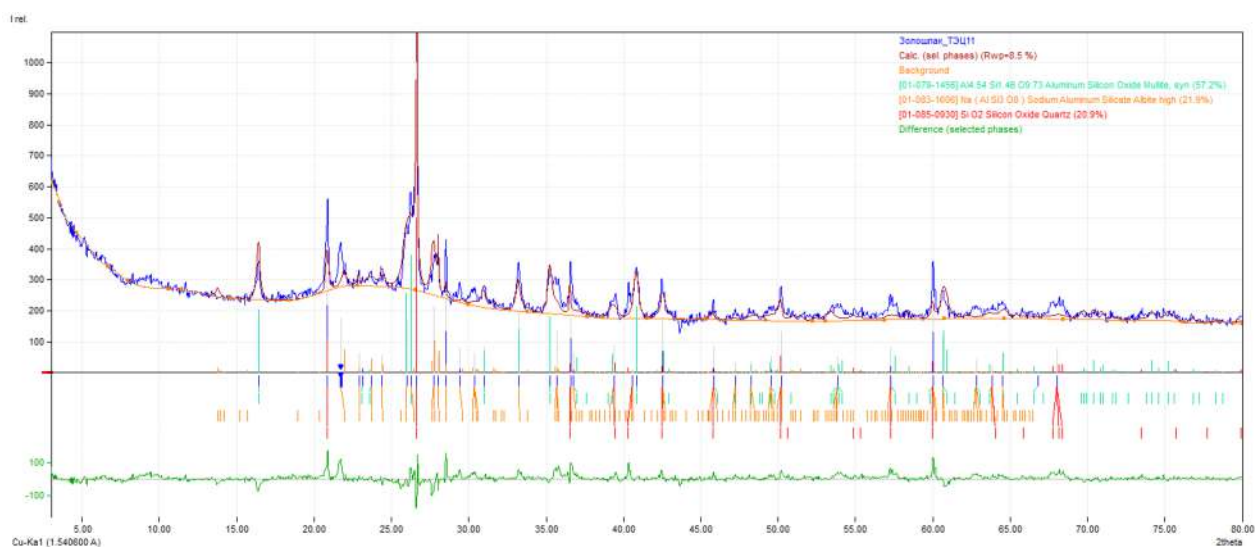


Рис. 5. Рентгенограмма золошлаковой смеси

Также к основным компонентам золошлаковой смеси относятся кварц и полевой шпат. Наличие кварца положительно сказывается на процессах структурообразования грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, так как в присутствии портландцемента и воды запускается сложный физико-химический процесс гидратации, приводящий к образованию прочных кристаллических структур, таких как кальцит, гидроксид кальция и кремнеземистые соединения.

Фазовый состав карбидного ила определен с помощью рентгенофазового анализа, который выявил преобладающие пики, соответствующие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 , как показано на рис. 6 и в табл. 6.

Результаты анализа показывают, что карбидный ил содержит значительное количество активного гидроксида кальция, который может реагировать с углекислым газом, образуя карбонат кальция.

В лабораторных условиях подобраны составы грунтов, укрепленных портландцементом и карбидным илом (табл. 7). Определены их физико-механические характеристики. Составы укрепленных грунтов № 1, № 2, № 3, № 6 соответствуют марке М10 по прочности, марке F25 по морозостойкости согласно требованиям ГОСТ 23558-94. Составы можно использовать для строительства автомобильных дорог низких технических категорий, подстилающих слоев и оснований под полы.

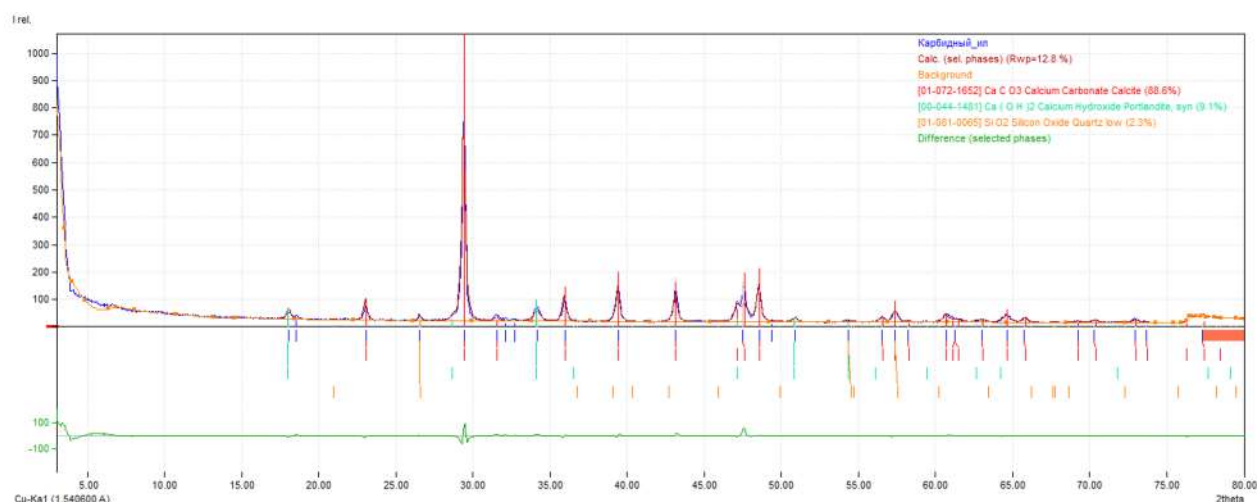


Рис. 6. Рентгенограмма карбидного ила

ТАБЛИЦА 6. Количественный фазовый анализ карбидного ила

Наименование	Формула	Содержание, %
Карбонат кальция, кальцит	CaCO_3	27,6
Гидроксид кальция, портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	60,4
Кварц с низким содержанием оксида кремния	SiO_2	10,6
Неопределенные	—	1,4

ТАБЛИЦА 7. Физико-механические характеристики составов укрепленного грунта

№ опыта	Содержание вяжущего		Прочность на сжатие в возрасте				Прочность на растяжение при изгибе в проектном возрасте (в водонасыщенном состоянии)	Водоустойчивость	Прочность на сжатие после 25 циклов замораживания и оттаивания
	Карбидный ил	Портландцемент	28 сут. (в водонасыщенном состоянии)	28 сут. (в сухом состоянии)	56 сут. (в водонасыщенном состоянии)	56 сут. (в сухом состоянии)			
1	–	4	0,9	1,2	–	–	0,2	0,7	0,7
2	–	6	1,0	1,5	–	–	0,2	0,7	0,9
3	–	8	1,1	1,7	–	–	0,2	0,7	0,9
4	9	1	–	–	1,1	1,6	0,1	0,7	–
5	9	2	–	–	1,3	1,8	0,1	0,7	–
6	9	3	–	–	1,5	2,0	0,2	0,8	1,2
7	10	–	–	–	0,3	0,4	0,0	0,7	–
8	12	–	–	–	0,4	0,5	0,0	0,8	–
9	16	–	–	–	0,5	0,6	0,1	0,8	–

На рис. 7 приведена зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной карбидным илом, от содержания карбидного ила.

Золошлаковая смесь, укрепленная карбидным илом, имеет низкие прочностные характеристики, что вызвано отсутствием обломочной фракции (более 2 мм) в зерновом составе золошлаковой смеси и относительно невысоким содержанием гидроксида кальция в карбидном иле. Введение в составы портландцемента позволяет повысить прочностные характеристики (рис. 8).

Заключение

Золошлаковые смеси и карбидный ил можно применять при строительстве земляных сооружений (автомобильные дороги, подсыпки, площадки и др.).

В лабораторных условиях разработаны составы золошлаковой смеси, укрепленной вяжущим на основе карбидного ила и портландцемента. Разработанные составы соответствуют марке М10 по прочности, марке F25 по морозостойкости согласно требованиям ГОСТ 23558-94. Составы можно использовать для строительства автомобильных дорог низких технических категорий, подстилающих слоев и оснований под полы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00426 (<https://rscf.ru/project/25-19-00426/>).

Список источников

1. Application of Coal Fly Ash in Pavement Subgrade Stabilisation: A Review / Z. Zimar [et al.] // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 312.

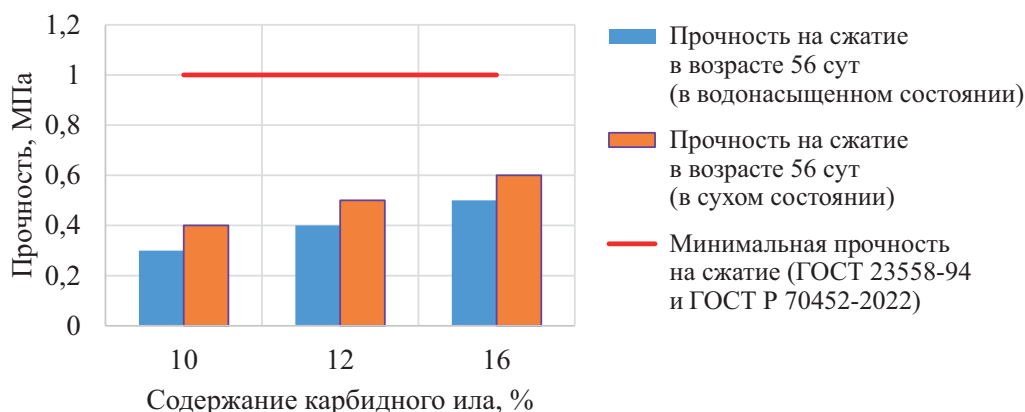


Рис. 7. Зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной карбидным илом, от содержания карбидного ила

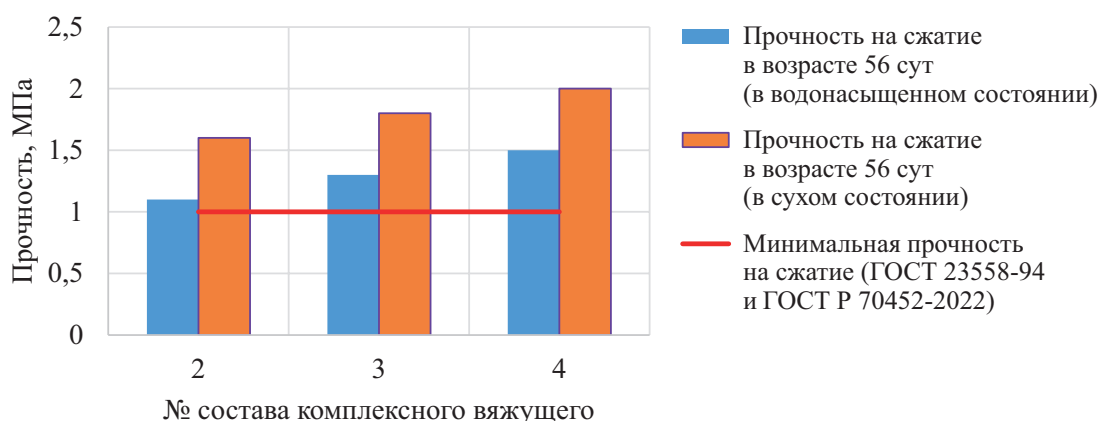


Рис. 8. Зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной комплексным вяжущим

2. Development of Alkali-Activated Binders Based on Technogenic Fibrous Materials / A. V. Klyuev [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (1). Pp. 60–73.

3. Experimental Studies of the Processes of Structure Formation of Composite Mixtures with Technogenic Mechanoactivated Silica Component / A. V. Klyuev [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (2). Pp. 5–18.

4. Application of Ash and Slag Waste From Coal Combustion in the Construction of the Earth Bed of Roads / S. V. Klyuev [et al.] // Construction Materials and Products. 2024. No. 7 (6). P. 3.

5. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Parametric Equations of the Strength Surface) / O. G. Novoselov [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (2). Pp. 104–120.

6. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Kinematic Method) / O. G. Novoselov [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (3). Pp. 5–17.

7. Specifics of Information Model Development for Functional Conversion of Offshore Oil Platforms /

S. G. Abramyan [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (4). Pp. 42–57.

8. Influence of Electric Current on the Mineral Matrix of Technogenic Anhydrite / A. N. Gumeniuk [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2025. Vol. 18, no. 1 (133). Art. 13302.

9. Слободчикова Н. А., Лофлер М., Плюта К. В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства. Известия вузов // Инвестиции. Строительство. Недвижимость: научный журнал. 2017. Т. 7, № 2. С. 62–67.

10. Слободчикова Н. А., Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства. Известия вузов // Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8, № 2. С. 141–147.

11. Efficient Machine Learning Method for Evaluating Compressive Strength of Cement Stabilized Soft Soil / C. Zhang [et al.] // Construction and Building Materials. 2023. P. 392.

12. Finely Dispersed Composite Binder for Soil Fixation by Injection Method / A. N. Grishin [et al.] // Vestnik MGSU. 2017. No. 12 (110). Pp. 1289–1298.

13. Rodygin K. S., Gyrdaymova Yu. V., Ananikov V. P. Carbide Sludge as a Key Inorganic Component of a Sustainable Carbon Cycle // Advances in Chemistry. 2022. Vol. 91, no. 7. P. 38.

14. Potentiometric Method for Assessing Pozzolanic Activity of Highly Dispersed Materials. Nanotechnology in Construction / Yu. V. Sokolova [et al.] // Scientific Internet Journal. 2023. Vol. 15, no. 4. Pp. 349–358.

Дата поступления: 11.05.2026

Решение о публикации: 29.06.2026

Информация об авторах:

РЯБЫХ Дмитрий Михайлович — аспирант;
89273452615@yandex.ru

КЛЮЕВ Сергей Васильевич — доктор
техн. наук, профессор; klyuyev@yandex.ru

КЛЮЕВ Александр Васильевич — инженер
кафедры сопротивления материалов и строитель-
ной механики; Klyuyevav@yandex.ru

СЛОБОДЧИКОВА Надежда Анатольевна —
кандидат техн. наук, доцент;
NSlobodchikova@rambler.ru

Modified Composites Based on the Use of Ash and Slag Mixtures and Carbide Sludge for the Construction of Earthworks

D. M. Ryabikh¹, S. V. Klyuev^{1,2}, A. V. Klyuev², N. A. Slobodchikova^{1,3}

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradskij ave., Moscow, 125319, Russia

² Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russia

For citation: Ryabikh D. M., Klyuev S. V., Klyuev A. V., Slobodchikova N. A. Modified Composites Based on the Use of Ash and Slag Mixtures and Carbide Sludge for the Construction of Earthworks // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 743–753. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-743-753 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop compositions of modified composites based on the use of ash and slag mixtures and carbide sludge for the construction of earthworks. There is a large amount of research on the use of various types of waste for strengthening and stabilizing soils in the world practice. The most interesting from the point of view of large-tonnage use in earthworks are ash and slag waste from coal combustion and carbide sludge. **Methods:** formation of an experiment planning matrix. Conducting an experiment that includes: determining the characteristics of the starting materials, making samples with different binder contents, holding samples, and determining quality characteristics. Analysis of the obtained results. **Results:** the studied sample of the ash and slag mixture is technogenic powdery sand. According to the modulus of basicity, the ash and slag mixture is super-rich. In terms of mineral composition, the main components of the ash and slag mixture include quartz and feldspar. The carbide sludge contains a significant amount of active calcium hydroxide, which can react with carbon dioxide to form calcium carbonate. Based on the results of the work performed, the properties of the initial components were determined and the compositions of the ash and slag mixture reinforced with a binder based on carbide sludge and Portland cement were developed. The dependence of the strength characteristics of the ash and slag mixture reinforced with carbide sludge on the content of carbide sludge is determined. **Practical significance:** the developed compositions can be used for the construction of an additional layer of the base of the road surface and layers of the roadbed of low technical categories, underlying layers and foundations for floors.

Keywords: zologrunt mixtures, ash and slag mixtures, ash and slag mixtures reinforced with carbide sludge and Portland cement, soils

References

1. Zimar Z., et al. Application of Coal Fly Ash in Pavement Subgrade Stabilisation: A Review, *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 312.
2. Klyuev A. V., et al. Development of Alkali-Activated Binders Based on Technogenic Fibrous Materials, *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (1), pp. 60–73.
3. Klyuev A. V., et al. Experimental Studies of the Processes of Structure Formation of Composite Mixtures with Technogenic Mechanoactivated Silica Component, *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (2), pp. 5–18.
4. Klyuev S. V., et al. Application of Ash and Slag Waste from Coal Combustion in the Construction of the Earth Bed of Roads, *Construction Materials and Products*, 2024, no. 7 (6), p. 3.
5. Novoselov O. G., et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Parametric Equations of the Strength Surface), *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (2), pp. 104–120.
6. Novoselov O. G., et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Kinematic Method), *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (3), pp. 5–17.
7. Abramyan S. G., et al. Specifics of Information Model Development for Functional Conversion of Offshore Oil Platforms, *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (4), pp. 42–57.
8. Gumeniuk A. N., et al. Influence of Electric Current on the Mineral Matrix of Technogenic Anhydrite, *Magazine of Civil Engineering*, 2025, vol. 18, no. 1 (133), art. no. 13302.
9. Slobodchikova N. A., Lofler M., Plyuta K. V. Poluchenie neorganicheskogo vyazhushchego na osnove otkhodov promyshlennogo proizvodstva [Production of Inorganic Binder Based on Industrial Waste], *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost [Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real Estate: scientific journal]*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 62–67. (In Russian)
10. Slobodchikova N. A., Lofler M. Metodiki podbora sostavov gruntov, ukreplennykh izvestyu,

dlya dorozhnogo stroitelstva [Methods for Selecting Soil Compositions Stabilized with Lime for Road Construction], *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost* [Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real Estate], 2018, vol. 8, no. 2, pp. 141–147. (In Russian)

11. Zhang C., et al. Efficient Machine Learning Method for Evaluating Compressive Strength of Cement Stabilized Soft Soil, 2023, p. 392.

12. Grishin A. N., et al. Finely Dispersed Composite Binder for Soil Fixation by Injection Method, *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering], 2017, no. 12 (110), pp. 1289–1298.

13. Rodygin K. S., Gyrdaymovaya Yu. V., Ananikov V. P. Carbide Sludge as a Key Inorganic Component of a Sustainable Carbon Cycle, *Advances in Chemistry*, 2022, vol. 91, no. 7, p. 38.

14. Sokolova Yu. V., et. al. Potentiometric Method for Assessing Pozzolanic Activity of Highly Dispersed Materials. Nanotechnology in Construction, *Scientific Internet Journal*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 349–358.

Received: May 11, 2026

Accepted: June 29, 2026

Author's information:

Dmitrij M. RYABYKH — Postgraduate Student;
89273452615@yandex.ru

Sergej V. KLYUEV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; klyuyev@yandex.ru

Aleksandr V. KLYUEV — Engineer of the
“Resistance of Materials and Structural Mechanics”
Department; Klyuyevav@yandex.ru

Nadezhda A. SLOBODCHIKOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; NSlobodchikova@rambler.ru

УДК 625.746.5:629.735.33

Численное моделирование влияния деформаций плит перронного покрытия, обусловленных проходкой тоннелей, на коэффициент динамичности при воздействии AIRBUS A380-800

В. Н. Кавказский

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

Для цитирования: Кавказский В. Н. Численное моделирование влияния деформаций плит перронного покрытия, обусловленных проходкой тоннелей, на коэффициент динамичности при воздействии AIRBUS A380-800 // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 754–763. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-754-763

Аннотация

Цель: обоснование коэффициента динамичности для проектирования тоннелей под перроном с учетом деформаций плит покрытия от проходки и воздействия Airbus A380-800. **Метод:** разработанная плоская двухмассная динамическая модель системы «колесо — плита покрытия — грунтовое основание». Уравнения движения выведены в переменных Лагранжа, приведены к форме Коши и проинтегрированы методом Рунге — Кутты 4-го порядка с шагом 0,0005 с. **Результаты:** получены зависимости пикового коэффициента динамичности $K_d^{\max}$ от высоты неровности и скорости. Установлено, что учет реальной эффективной массы плиты (6200 кг вместо 1000 кг) снижает пики на 15–20 %, а многоколесность шасси дополнительно сглаживает импульсы. **Практическая значимость:** для аэропорта Пулково $K_d^{\max} = 1,25$ норматив является консервативным при ограничении скорости руления A380-800 до 10 км/ч и поддержании ровности не ниже класса В. Рекомендовано для особых сочетаний нагрузок принимать $K_d = 1,5$. Полученные регрессионные модели ($K_d^{\max} = 1 + \alpha \cdot h$, $\alpha = 0,07\text{--}0,102$ и $K_d^{\max} = 1,23 + 0,019 \cdot v$) могут использоваться при уточненных расчетах ресурса покрытий.

Ключевые слова: Airbus A380-800, коэффициент динамичности, цементобетонное покрытие перрона, двухмассная динамическая модель, метод Рунге — Кутты, неровность покрытия, подземные тоннели

Введение

С вводом в эксплуатацию супертяжелых воздушных судов (ВС) класса F (Airbus A380-800, Boeing 747-8) возникла необходимость пересмотра подходов к расчету аэродромных покрытий. Максимальная взлетная масса A380–800 достигает 575 т, давление в шинах — 1,5 МПа, классификационное число ACN для жесткого покрытия — 94 R/D/M [1, 2]. При движении по перрону, особенно в зонах размещения подземных сооружений (же-

лезнодорожные тоннели, коммуникационные коллекторы), динамические добавки к статической нагрузке могут существенно влиять на напряженно-деформированное состояние системы «покрытие — основание».

Действующие российские нормы (СП 121.13330.2019) предписывают использовать коэффициент динамичности $K_d = 1,25$ для аэродромных покрытий. Однако для ВС сверхбольшой грузоподъемности, движущихся по реальным поверхностям с неизбежными

неровностями стыков, выбоинами и наплывами, этот коэффициент требует проверки и, возможно, уточнения. Зарубежные руководства (ICAO Doc 9157, FAA AC 150/5320-6E) рекомендуют ориентироваться на максимальное колесное усилие, но не дают конкретных значений K_d для условий руления [3].

В настоящей работе выполнено численное моделирование динамического взаимодействия колеса А380–800 с цементобетонным покрытием перрона. Цель — обосновать применимость норматива $K_d = 1,25$ для аэропорта Пулково (г. Санкт-Петербург) и разработать практические рекомендации по ограничению скорости руления.

Математическая модель

Двухмассная динамическая система

Рассматривается плоская вертикальная модель, включающая:

- массу m_1 (приведенная масса колеса, подвески и части шасси, 2000 кг);
- массу m_2 (эффективная масса фрагмента цементобетонной плиты, вовлекаемая в колебания, в упрощенной модели принята 1000 кг).

Обобщенные координаты — абсолютные вертикальные перемещения масс $z_1(t)$ и $z_2(t)$. Силы упругости и вязкого демпфирования шины описываются коэффициентами $k_1 = 3,5 \times 10^6$ Н/м, $c_1 = 1,5 \cdot 10^4$ Н·с/м; грунтовое основание — моделью Винклера $k_2 = 1,5 \cdot 10^7$ Н/м и $c_2 = 1,5 \cdot 10^5$ Н·с/м. Вывод уравнений движения на основе второго закона Ньютона приводит к системе:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -k_1(z_1 - z_2) - c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - m_1 g, \\ m_2 \ddot{z}_2 = +k_1(z_1 - z_2) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k_2(z_2 - z_0) - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_0) - m_2 g. \end{cases} \quad (1)$$

Переход к динамическим переменным $y_i = z_i - z_i^{cm}$ (отсчет от статического равновесия) позволяет исключить силу тяжести. В результате получена линейная система для $y_1(t)$, $y_2(t)$:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 = -k_1(y_1 - y_2) - c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2), \\ m_2 \ddot{y}_2 = +k_1(y_1 - y_2) + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - k_2(y_2 - z_0) - c_2(\dot{y}_2 - \dot{z}_0). \end{cases} \quad (2)$$

Моделирование неровности и метод интегрирования

Неровность (стык плит или локальная выбоина) задана в виде гладкого синусоидального выступа длиной $L = 0,6$ м, высотой

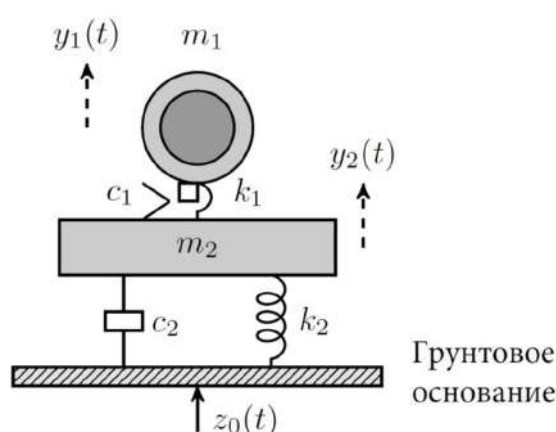


Рис. 1. Расчетная схема двухмассной динамической системы «колесо — плита покрытия — грунтовое основание»: m_1 — масса колеса с подвеской; m_2 — эффективная масса плиты; k_1 , c_1 — жесткость и демпфирование шины; k_2 , c_2 — жесткость и демпфирование основания Винклера; $z_0(t)$ — кинематическое возмущение от неровности

h (0–10 мм). При движении колеса со скоростью v перемещение основания:

$$\begin{aligned} z_0(t) &= h \sin^2 \left(\frac{\pi v t}{L} \right), \\ \dot{z}_0(t) &= \frac{\pi v h}{L} \sin \left(\frac{2\pi v t}{L} \right), \\ 0 \leq t &\leq \frac{L}{v}. \end{aligned} \quad (3)$$

Система (2) приведена к виду $\dot{q} = f(t, q)$ с вектором состояния $q = [y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2]^T$. Интегрирование выполнено методом Рунге — Кутты 4-го порядка (RK4) с фиксированным шагом $\Delta t = 0,0005$ с. Выбор шага обусловлен необходимостью разрешить высшие собственные частоты (до 50 Гц). На каждом шаге и на стадиях RK4 вычисляются значения $z_0(t)$ и $\dot{z}_0(t)$ в соответствующие моменты времени. Реализация выполнена в среде Excel VBA.

Определение коэффициента динамичности

Динамическая сила в контакте «колесо — покрытие»:

$$F_{\text{дин}}(t) = k_1 (y_1 - y_2) + c_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2). \quad (4)$$

Полная вертикальная реакция: $F_{\text{полн}}(t) = m_1 g + F_{\text{дин}}(t)$. Мгновенный коэффициент динамичности:

$$K_d(t) = 1 + \frac{F_{\text{дин}}(t)}{m_1 g}. \quad (5)$$

За расчетное принимается максимальное значение $K_d^{\max} = \max_t K_d(t)$ на временном интервале, включающем наезд на неровность и последующие затухающие колебания.

Результаты численных экспериментов

Влияние высоты неровности при фиксированной скорости

Табл. 1–3 содержат значения $K_d^{\max}$ для трех скоростей руления. Во всех случаях наблюдается практически линейный рост $K_d^{\max}$ с увеличением h .

Аппроксимация: $K_d^{\max} = 1 + 0,07h$ (h в мм, $R^2 > 0,99$). Время наезда $\Delta t = 0,216$ с, пик достигается с запаздыванием $\approx 0,1$ с из-за инерционности системы. На рис. 2 представлены временные зависимости $K_d(t)$ для этого режима.

Аппроксимация: $K_d^{\max} = 1 + 0,086h$. Наклон на 23 % выше, чем при 10 км/ч. Временные зависимости показаны на рис. 3.

Аппроксимация: $K_d^{\max} = 1 + 0,102h$. При этой скорости демпферы не успевают рассеять энергию, режим близок к ударному. Временные зависимости показаны на рис. 4.

ТАБЛИЦА 1. Зависимость $K_d^{\max}$ от высоты неровности ($v = 10$ км/ч)

h , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с
0	1,00	—
2	1,18	0,312
4	1,31	0,313
6	1,44	0,313
8	1,57	0,312
10	1,70	0,312

ТАБЛИЦА 2. Зависимость $K_d^{\max}$ от высоты неровности ($v = 15$ км/ч)

h , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с
0	1,00	—
2	1,20	0,145
4	1,36	0,145
6	1,52	0,144
8	1,69	0,144
10	1,86	0,144

ТАБЛИЦА 3. Зависимость $K_d^{\max}$ от высоты неровности ($v = 20$ км/ч)

h , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с
0	1,00	—
2	1,22	0,108
4	1,40	0,108
6	1,61	0,107
8	1,81	0,107
10	2,02	0,107

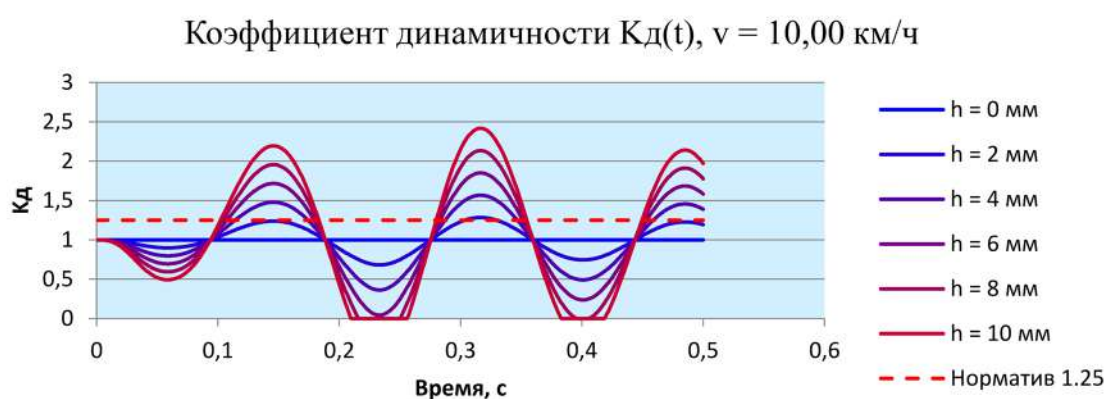


Рис. 2. Временные зависимости коэффициента динамичности $K_d(t)$ при скорости руления $v = 10$ км/ч для различных высот неровности $h = 2, 4, 6, 8, 10$ мм: пик достигается через $\approx 0,1$ с после окончания неровности; длительность пика менее 0,01 с; установившиеся значения после 0,8 с стабилизируются на уровне 1,23–1,36

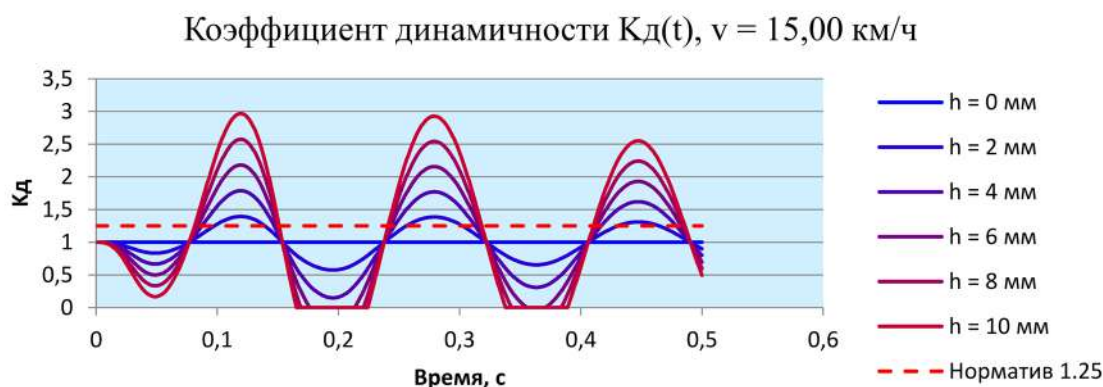


Рис. 3. Временные зависимости $K_d(t)$ при скорости руления $v = 15$ км/ч: пики более острые, чем при 10 км/ч, и смещены к $t \approx 0,145$ с; установившиеся значения близки к полученным при 10 км/ч

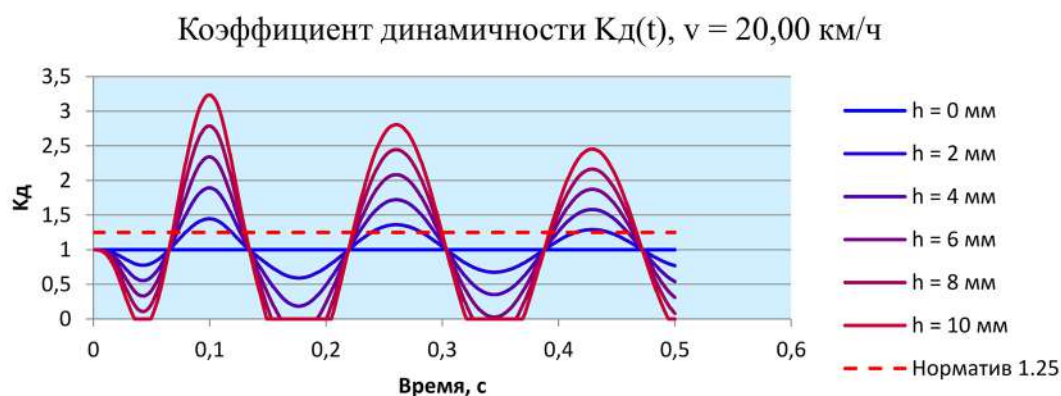


Рис. 4. Временные зависимости $K_d(t)$ при скорости руления $v = 20$ км/ч: пики максимально острые (длительность около 0,006 с); горизонтальная линия норматива $K_d(t) = 1,25$ пересекается уже при $h \approx 2,5$ мм

ТАБЛИЦА 4. Зависимость $K_d^{\max}$ от скорости руления ($h = 20$ км/ч)

v , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с	K_d (установившийся)
10	1,44	0,313	1,23
15	1,52	0,209	1,24
20	1,62	0,156	1,26

Влияние скорости при фиксированной неровности ($h = 6$ мм)

Данные, обобщенные в табл. 4, демонстрируют монотонный рост $K_d^{\max}$ со скоростью руления.

Линейная регрессия: $K_d^{\max} \approx 1,23 + 0,019v$ (v в км/ч, $R^2 > 0,99$). Разница между пиковым и установившимся значениями растет с 0,21 (при 10 км/ч) до 0,35 (при 20 км/ч), что

свидетельствует об усилении импульсного характера нагружения.

На рис. 5 приведены типичные графики перемещений колеса и плиты, иллюстрирующие деформацию шины и запаздывание реакции плиты.

Результаты обработки численных экспериментов обобщены на рис. 6, где приведены аппроксимирующие зависимости пикового коэффициента динамичности от высоты неровности для трех скоростей руления, и на рис. 7, где сопоставлены пиковые и установившиеся

значения коэффициента для неровности высотой 6 мм при различных скоростях.

Анализ

Сравнение с нормативом СП 121.13330.2012

Нормативное значение $K_d = 1,25$ достигается только для идеально ровной поверхности ($h = 0$). Уже при $h = 2$ мм и $v = 10$ км/ч $K_d^{\max} = 1,18$ (чуть ниже норматива), но при $h = 4$ мм — 1,31 (превышение на 5 %). Для реальных эксплуатационных условий (класс



Рис. 5. Перемещения колеса $y_1(t)$ и плиты $y_2(t)$ при проезде А380 по неровности ($h = 10$ мм, $v = 15$ км/ч): положительные значения соответствуют подъёму от статического положения; разность кривых — деформация шины; видно опережение колеса (пик при $t \approx 0,023$ с) и последующие затухающие колебания.

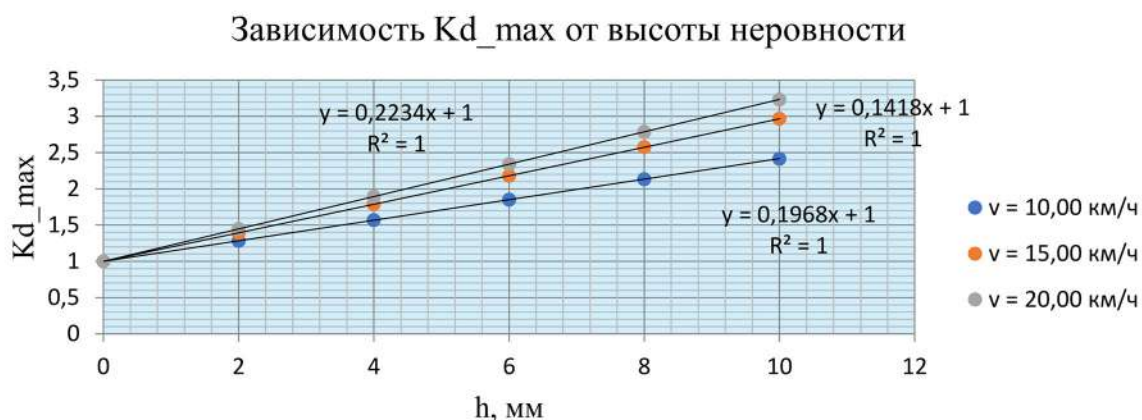


Рис. 6. Сравнение линейных регрессий $K_d^{\max}(h)$ для трех скоростей руления (10, 15, 20 км/ч): показано, что с увеличением скорости наклон возрастает от 0,07 до 0,102

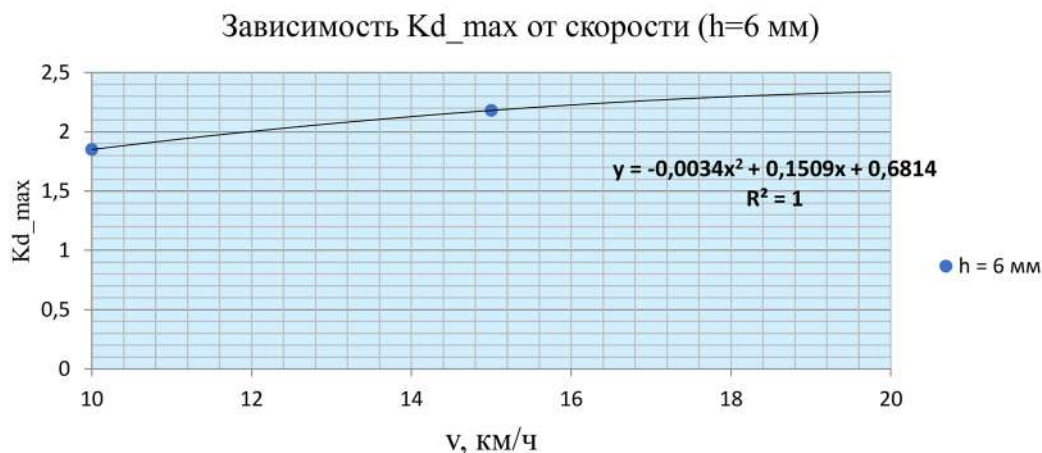


Рис. 7. Сопоставление пиковых и установившихся значений K_d для $h = 6$ мм при разных скоростях: разница между пиком и установившимся значением растет с увеличением скорости (от 0,21 до 0,35), что указывает на усиление импульсного характера нагрузки



Рис. 8. Гистограмма сопоставления пикового и установившегося K_d с нормативом $K_d = 1,25$ для трех скоростей при $h = 6$ мм: норматив превышает только пиковыми значениями, тогда как установившиеся значения остаются ниже норматива (при $v = 10$ км/ч) или незначительно превышают его (1,26 при $v = 20$ км/ч)

ровности В, $h \leq 6$ мм) пиковый коэффициент составляет 1,44 при $v = 10$ км/ч, что на 15 % выше норматива (рис. 8).

Однако важно отметить несколько факторов, делающих норматив $K_d = 1,25$ консервативным:

1. Кратковременность пика. Длительность превышения $K_d > 1,25$ составляет менее 0,01 с, что соответствует единичному циклу нагруже-

ния. Усталостные явления в бетоне и арматуре при такой длительности не проявляются.

2. Учет реальной массы плиты. В расчетах намеренно использована упрощенная модель с $m_2 = 1000$ кг (соответствует очень тонкому покрытию). Для реальной конструкции перрона Пулково (плиты $7,5 \times 7,5 \times 0,58$ м, щебеночное основание) эффективная масса зоны, вовлеченной в колебания, составляет

$m_{2, \text{реал}} = 6200$ кг. Предварительные расчеты показывают, что замена $m_2 = 1000$ кг на 6200 кг снижает $K_d^{\max}$ на 15–20 %. Следовательно, при реальной массе плиты даже пиковое значение не превысит $1,44 \cdot 0,85 = 1,22$, то есть окажется ниже норматива.

3. Многоколесность шасси. Реальная стойка А380-800 имеет четыре колеса (крыльевая стойка) или шесть (фюзеляжная). Интерференция колебаний от соседних колес и перекрытие эпюр прогибов приводят к дополнительному сглаживанию динамических импульсов. Расчет для одного колеса дает завышенные оценки, то есть является консервативным.

Рекомендации по ограничению скорости

Для зон перрона, под которыми расположены подземные железнодорожные тоннели (как в аэропорту Пулково), целесообразно установить максимальную скорость руления А380-800 10 км/ч. При этом:

- пиковый $K_d^{\max}$ не превышает 1,44 (а с учетом реальных условий — не более 1,22–1,25);
- установившиеся колебания после проезда неровности дают $K_d \approx 1,23$, что практически совпадает с нормативом;
- остаточные осадки плиты не превышают 10 мм при предельно допустимых 40 мм.

Для особых (аварийных) сочетаний нагрузок

При возникновении неровности высотой до 10 мм (например, в результате повреждения покрытия) и неконтролируемом движении со скоростью до 20 км/ч $K_d^{\max}$ может достигать

2,02 по упрощенной модели. Однако реальное значение с учетом массы плиты и многоколесности будет ниже. В качестве запаса для аварийных расчетов можно рекомендовать $K_d = 1,5$, что покрывает большинство сценариев.

Заключение

1. На основе разработанной двухмассной динамической модели и численного интегрирования методом Рунге — Кутты 4-го порядка получены количественные оценки коэффициента динамичности для взаимодействия колеса А380-800 с цементобетонным покрытием перрона.

2. Установлено, что нормативное значение $K_d = 1,25$ (СП 121.13330.2012) является консервативным для реальных условий аэропорта Пулково при соблюдении следующих эксплуатационных ограничений:

- скорость руления А380-800 в зонах с подземными сооружениями — не более 10 км/ч;
- ровность покрытия поддерживается не ниже класса В ($h \leq 6$ мм).

3. Приведены аппроксимирующие зависимости:

$$K_d^{\max} = 1 + (0,07 - 0,102) \cdot h \quad (h \text{ в мм}),$$

$$K_d^{\max(v)} \approx 1,23 + 0,019v \quad (v \text{ в мм}).$$

Они могут быть использованы при уточненных расчетах ресурса покрытия и разработке систем управления скоростью.

4. Для аварийных (особых) сочетаний нагрузок допускается применение $K_d^{\max} = 1,5$, что обеспечивает дополнительный запас.



Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Список источников

1. СП 121.13330.2019. Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96. М.: Минрегион России, 2012. 89 с.
2. Airbus S.A.S. A380 Airplane Characteristics for Airport and Maintenance Planning. Blagnac: Airbus, 2019. Rev. 12. 280 p.
3. ICAO. Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements. Doc 9157. 3rd ed. Montreal: ICAO, 2019. 210 p.
4. Butcher J.C. The Numerical Analysis of Ordinary Differential Equations: Runge–Kutta and General Linear Methods. Chichester: Wiley, 1987. 528 p.
5. Hairer E., Nørsett S. P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. Berlin: Springer, 1993. 528 p.
6. Анализ динамического отклика аэродромных покрытий при рулении самолета для оценки несущей способности покрытия / Ц. Донг [и др.] // Journal of Zhejiang University Science A. 2021. Vol. 22, no. 4. Pp. 312–326.
7. Татаринов В. В., Фомин А. В. Расчет прогибов плиты аэродромного покрытия с учетом размера

отпечатка авиашины // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2017. № 2 (12). С. 45–52.

8. Разработка методики повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене / И. М. Рябов [и др.] // iPolytech Journal. 2020. Т. 24, № 3. С. 521–530.
9. Federal Aviation Administration (FAA). Advisory Circular 150/5320-6E. Airport Pavement Design and Evaluation. 2009. 145 p.
10. Livesley R. K. Some Notes on the Mathematical Theory of a Loaded Elastic Plate Resting on an Elastic Foundation // Department of Mathematics, The University, Manchester. 1951.

Дата поступления: 15.05.2026

Решение о публикации: 14.07.2026

Информация об авторах:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Тоннели и метрополитены»; kavkazskiy_vn@mail.ru

Numerical Modeling of Dynamic Load of Airbus A380-800 on Apron Pavement and Justification of Dynamic Coefficient

V. N. Kavkazskij

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Kavkazskij V. N. Numerical Modeling of Dynamic Load of Airbus A380-800 on Apron Pavement and Justification of Dynamic Coefficient // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 754–763. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-754-763 (In Russian)*

Abstract

Objective: to substantiate the dynamicity coefficient for the design of tunnels under the apron, taking into account the deformations of the coating plates from the penetration and impact of the Airbus A380-800. **Methods:** a flat two-mass dynamic model of the “wheel — coating plate — ground base” system has been developed. The equations of motion are derived in Lagrange variables, reduced to Cauchy form, and integrated by the Runge Kutta method of the 4th order in increments of 0.0005 s. **Results:** the dependence of the peak coefficient of dynamism on the height of the bump and speed is obtained. It was found that taking into account the actual effective mass of the plate (6200 kg instead of 1000 kg) reduces peaks by

15-20%, and the multi-wheeled chassis additionally smooths out impulses. **Practical significance:** for Pulkovo Airport, the standard is conservative when limiting the taxiing speed of the A380 800 to 10 km/h and maintaining evenness not lower than class B. It is recommended for special combinations of loads to take. The obtained regression models can be used for refined calculations of the coverage resource.

Keywords: Airbus A380-800, dynamic coefficient, concrete apron pavement, two-mass dynamic model, Runge — Kutta method, pavement roughness, underground tunnels

References

1. SP 121.13330.2019. Aerodromy [Aerodromes]. Updated version of SNIP 32-03-96. Moscow: Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2012, 89 p. (In Russian)
2. Airbus S.A.S. A380 Airplane Characteristics for Airport and Maintenance Planning. Blagnac: Airbus, 2019. Rev. 12, 280 p.
3. ICAO. Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements. Doc 9157. 3rd ed. Montreal: ICAO, 2019, 210 p.
4. Butcher J.C. The Numerical Analysis of Ordinary Differential Equations: Runge — Kutta and General Linear Methods. Chichester, Wiley, 1987, 528 p.
5. Hairer E., Nørsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. Berlin, Springer, 1993, 528 p.
6. Dong C., et al. Analiz dinamicheskogo otklika aerodromnykh pokrytiy pri ruleni samoleta dlya otsenki nesushchey sposobnosti pokrytiya [Analysis of the Dynamic Response of Airfield Pavements During Aircraft Taxiing to Assess Bearing Capacity], *Journal of Zhejiang University Science A*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 312–326. (In Russian)
7. Tatarinov V. V., Fomin A. V. Raschet progibov plity aerodromnogo pokrytiya s uchetom razmera otpechatka aviashiny [Calculation of Deflections

of an Airfield Pavement Slab Considering the Size of the Aircraft Tire Imprint], *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura [Automobile. Road. Infrastructure]*, 2017, no. 2 (12), pp. 45–52. (In Russian)

8. Ryabov I. M., et al. Razrabotka metodiki povysheniya bezopasnosti avtomobilya putem nauchno obosnovannogo vybora serii profilya shin pri ikh zamene [Development of a Methodology to Improve Vehicle Safety Through a Scientifically Grounded Selection of Tire Profile Series During Replacement], *iPolytech Journal*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 521–530. (In Russian)

9. Federal Aviation Administration (FAA). Advisory Circular 150/5320-6E: Airport Pavement Design and Evaluation, 2009, 145 p.

10. Livesley R. K. Some Notes on the Mathematical Theory of a Loaded Elastic Plate Resting on an Elastic Foundation, Department of Mathematics, The University, Manchester, 1951.

Received: May 15, 2026

Accepted: July 14, 2026

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the “Tunnels and Subways” Department; kavkazskiy_vn@mail.ru

УДК 624.074.434, 624.016

Комбинированная конструкция большепролетного здания

В. В. Веселов

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

Для цитирования: *Веселов В. В.* Комбинированная конструкция большепролетного сооружения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 764–775. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-764-775

Аннотация

Цель: разработать комбинированную конструкцию большепролетного здания, в том числе для применения на транспорте. Она может быть использована для зданий вокзалов, навесов, дебаркадеров, стадионов, спортивных сооружений, так как обладает повышенной жесткостью, надежностью, стойкостью к прогрессирующему обрушению при снижении материалоемкости. **Методы:** анализ применяемых большепролетных конструкций, разработка инновационного решения каркаса большепролетного здания, его расчет с привлечением программного комплекса. **Результаты:** известные конструкции большепролетных зданий и сооружений нередко отличаются недостаточной жесткостью и устойчивостью к прогрессирующему обрушению, а также характеризуются высоким расходом материалов. Для каркасов зданий и сооружений с большими пролетами, в том числе объектов транспортной инфраструктуры, чаще всего используют металлические конструкции: они отличаются высокой прочностью и архитектурной выразительностью. Однако традиционные решения на основе металла сопряжены со значительными затратами. На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС ведутся разработки инновационных конструкций с применением сталебетона. Создана и рассчитана комбинированная конструкция седловидного покрытия здания (сооружения) прямоугольной или овальной формы в плане. Конструкция включает параллельно расположенные арки в направлении ширины объекта с переменной стрелой подъема (она увеличивается к торцевым частям), ряд параллельно расположенных жестких вант в направлении длины объекта. Они соединены с арками в местах пересечения, формируя седловидное пространственное большепролетное покрытие. Арки выполнены из трубчатых профилей и имеют сквозное сечение: два нижних (внутренних) пояса, один верхний (внешний) пояс, заполненный бетоном, а также решетку. В торцах объекта арки наклонены наружу и подкреплены стойками фахверка. Жесткие ванты изготовлены из металлических предварительно напряженных двутавровых балок. Верхний (внешний) пояс торцевых арок закреплен предварительно напряженными оттяжками, а опорные части арок соединены предварительно напряженными затяжками. Проведен расчет предложенной конструкции. **Практическая значимость:** установлена эффективность применения комбинированных сталебетонных конструкций в каркасах большепролетных зданий. Предлагаемая конструкция каркаса здания имеет сниженный расход стали на 16 % при повышении жесткости на 8 % в сравнении с известными конструкциями металлических каркасов большепролетных зданий. Комбинированная конструкция седловидного покрытия рациональна для применения в вокзальных комплексах, навесах, дебаркадерах и других сооружениях на транспорте.

Ключевые слова: большепролетные покрытия, седловидное покрытие, здания и сооружения, металлические конструкции, комбинированные конструкции, сталебетон, несущая способность, жесткость, прогрессирующее обрушение

Введение

Большепролетные конструкции зданий и сооружений обычно относятся к классам сооружений КС-2 (нормальный уровень) с высоким скоплением людей и КС-3 (повышенный уровень). В связи с этим к их расчету и конструированию предъявляются особые требования [1].

В настоящее время при создании больших пролетов покрытий, например, в зданиях вокзалов, выставочных павильонов, стадионов, спортивных комплексов и т. п., предпочитают использовать металлические (стальные) несущие конструкции, чаще пространственные (перекрестно-стержневые структуры, оболочки). Они достаточно легкие, прочные, при этом надежные и обладают хорошей стойкостью к прогрессирующему обрушению [2]. Однако металлические конструкции в каркасах зданий и сооружений весьма дороги и подвергаются чрезмерным деформациям и повреждениям в процессе эксплуатации [3, 4].

Для устранения указанных недостатков металлических конструкций покрытий зданий и сооружений, а также каркасов в целом рационально применение комбинированных конструкций из стали и бетона [5–7], в том числе с использованием искусственного регулирования усилий, что обеспечивает уменьшение поперечных сечений элементов при снижении расхода стали на каркас здания [8].

В практике проектирования современных зданий с большими пролетами иногда применяют металлические оболочки отрицательной гауссовой кривизны, которые обладают яркой архитектурной формой и выразительностью. В частности, известно висячее покрытие седловидной формы на ромбовидном или прямоугольном плане, состоящее из опорного контура и жесткозакрепленных арок, которые размеще-

ны вдоль одной из диагоналей сооружения, скреплены с вантами, расположенными вдоль другой диагонали сооружения, и пересекаются с арками [9].

Недостатками данного покрытия и подобных металлических конструкций является высокая материалоемкость из-за значительного расхода стали на опорную часть и арки, а также недостаточная жесткость покрытия.

На кафедре ПГУПС «Строительные конструкции, здания и сооружения» продолжают исследования и расчеты новых конструкций каркасов зданий и их несущих элементов, в том числе покрытий, обладающих повышенной жесткостью, прочностью и надежностью при минимальной стоимости и трудоемкости изготовления [10–15].

Практическое применение и результаты

Разработана и рассчитана конструкция сооружения с инновационным комбинированным седловидным большепролетным покрытием (рис. 1), которая защищена патентом на изобретение [16].

Предлагаемая комбинированная конструкция может быть использована для большепролетного сооружения со свободной планировкой (стадионы, выставочные павильоны, спортивные комплексы, вокзалы, дебаркадеры и т. п.) и представляет собой оболочку отрицательной гауссовой кривизны на прямоугольном или овальном плане. Каркас сооружения включает систему параллельно расположенных арок с возрастающей стрелой подъема к торцам сооружения, а также систему параллельно расположенных жестких вант, которые перпендикулярны аркам и жестко соединены с ними в местах пересечения, образуя большепролетное седловидное пространственное покрытие (рис. 1).

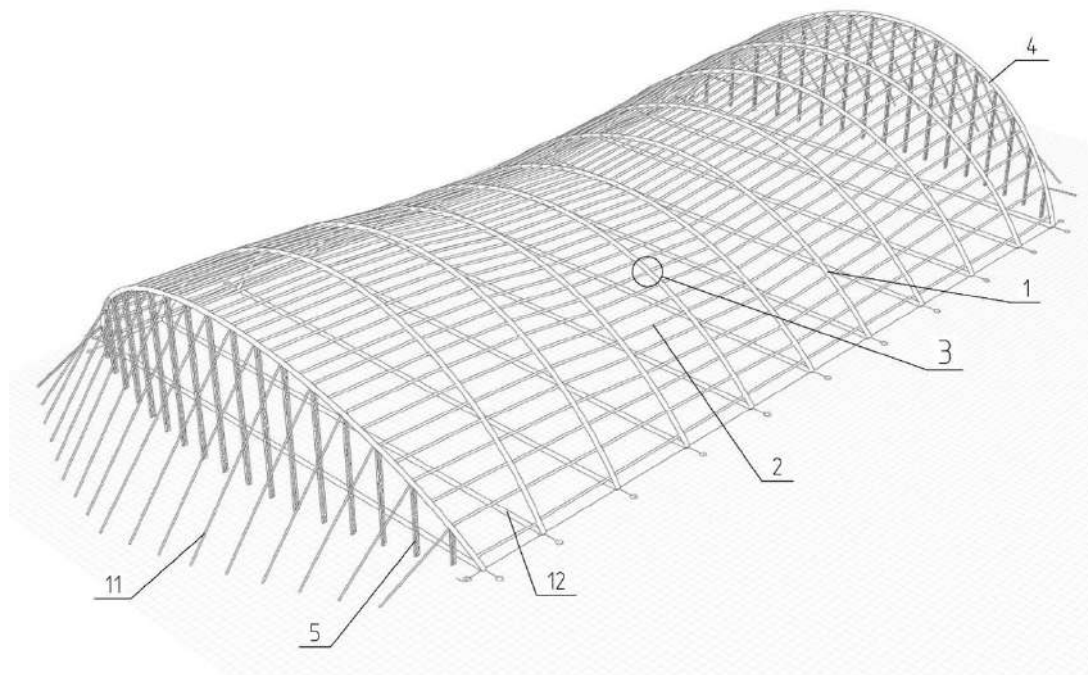


Рис. 1. Общий вид каркаса здания с комбинированным седловидным пространственным покрытием: 1 — сталебетонная арка; 2 — жесткий вант; 3 — узел сопряжения арки и ванта; 4 — торцевая сталебетонная арка; 5 — стойка фахверка; 11 — оттяжка; 12 — затяжка

Арки крайних рядов (торцевые арки) наклонены наружу сооружения и подкреплены стойками фахверка. Жесткие ванты, провисающие к центру сооружения, запроектированы из стальных двутавров с предварительным напряжением. Рядовые арки — сквозного поперечного сечения с применением трубчатых профилей, состоящие из двух внутренних поясов и одного внешнего пояса, заполненного бетоном. Все пояса соединены между собой стойками и раскосами (рис. 2). Базы арок соединены затяжками из стальных двутавров или канатов с предварительным напряжением для восприятия распорных усилий арок, а торцевые арки, воспринимающие распорные усилия от вант, подкрепляются оттяжками из стальных предварительно напряженных канатов. При этом участки пересечения вант и арок снабжены

опорными столиками, обеспечивающими удобство монтажа и крепления элементов (рис. 3).

Из общепринятой практики проектирования известно, что оболочки отрицательной гауссовой кривизны рекомендуется применять в покрытиях пролетом $L \leq 18$ м (однослойные) и $L \leq 100$ м (двухслойные). Стрела провиса оболочки — $L/10$ – $L/4$, а расстояние между поясами двухслойной оболочки — $L/80$ – $L/30$ [17].

Использование жестких предварительно напряженных вант из металлических двутавров разгружает арки от усилий общего изгиба, позволяет рационально распределить нагрузки с рядовых на торцевые арки, повышая изгибную жесткость сооружения, что эффективно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

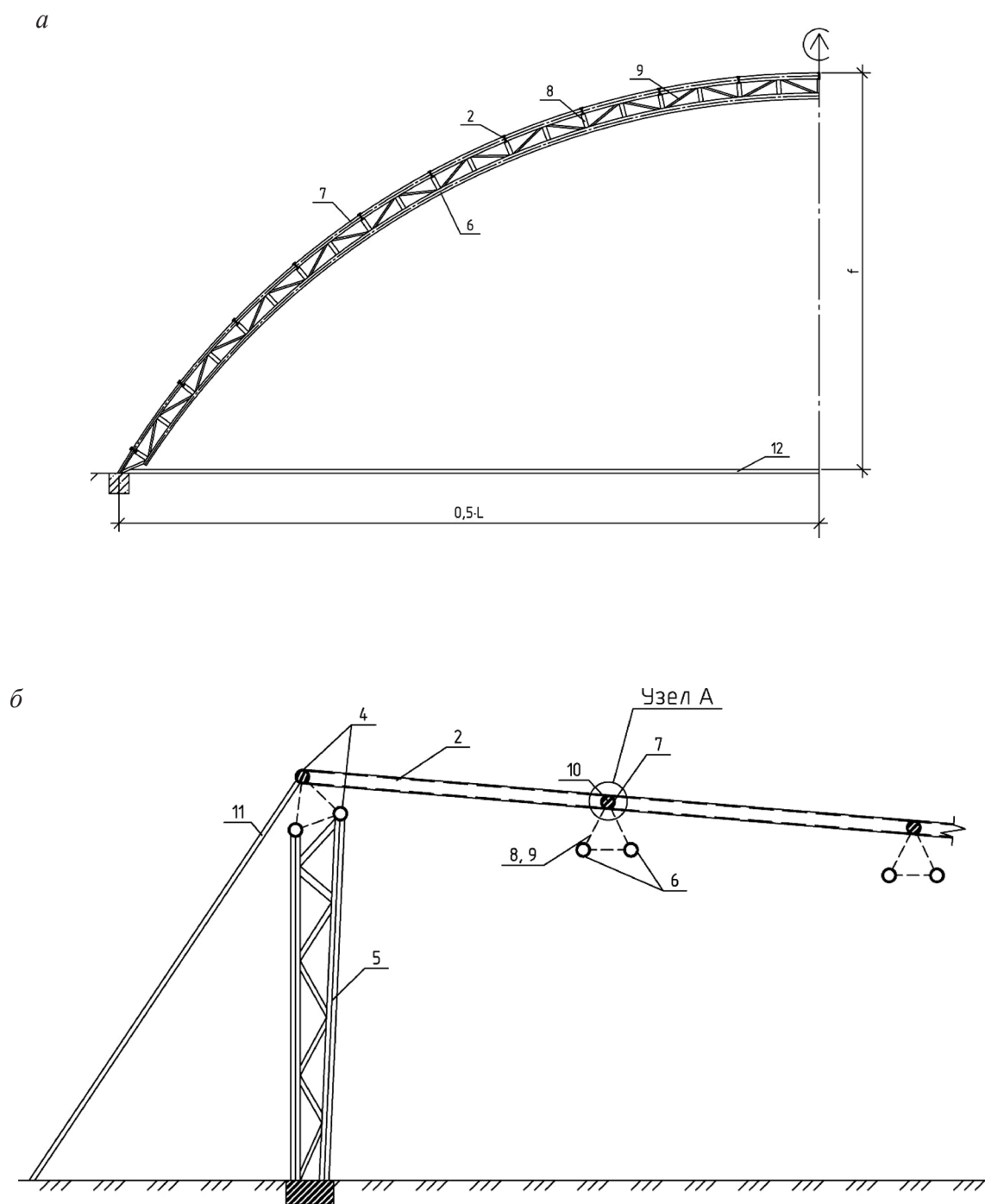


Рис. 2. Поперечные сечения по каркасу здания с комбинированным седловидным пространственным покрытием: *а* — фрагмент поперечного сечения; *б* — фрагмент продольного сечения.

2 — жесткий вант; 4 — торцевая сталебетонная арка; 5 — стойка фахверка; 6 — внутренний пояс арки; 7 — внешний пояс арки; 8 — раскос решетки арки; 9 — стойка решетки арки; 10 — бетон, 11 — оттяжка; 12 — затяжка

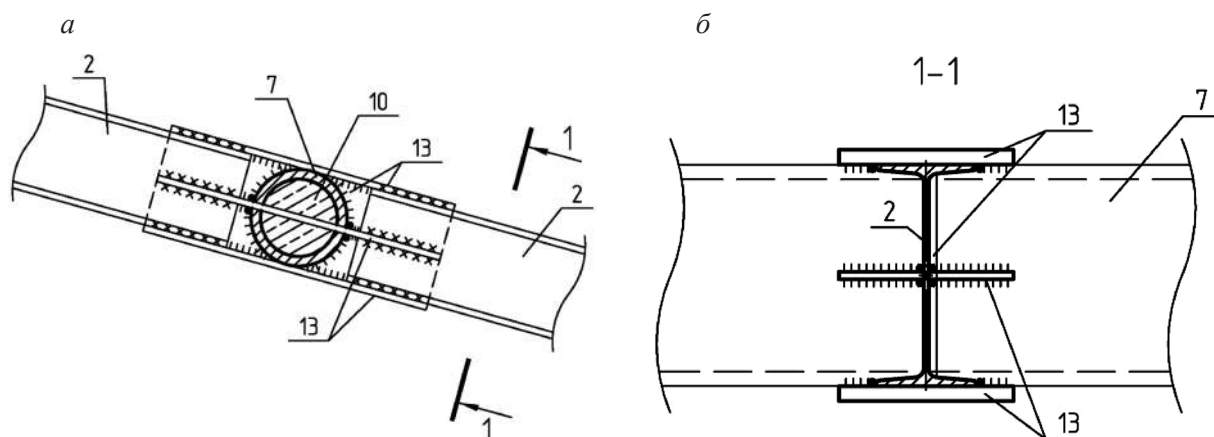


Рис. 3. Узел сопряжения сталебетонной арки и вант (узел А):

а — общий вид узла; *б* — сечение 1-1. 1 — сталебетонная арка; 2 — жесткий вант;
7 — внешний пояс арки; 10 — бетон; 13 — опорный столик

Использование стоек фахверка для опор арок в торцах сооружения повышает изгибную жесткость и несущую способность арок при их загрузении, что эффективно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Наклон крайних (торцевых) арок наружу большепролетного сооружения и использование оттяжек из предварительно напряженных канатов, которые закреплены к верхнему поясу крайних арок, обеспечивают рациональное восприятие распорных усилий от провисающих вант, что эффективно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Использование двух нижних (внутренних) поясов, соединенных между собой стойками и раскосами, эффективно увеличивает жесткость арок в горизонтальной плоскости, существенно снижает их гибкость и позволяет отказаться от применения дополнительных связей для обеспечения устойчивости арок, что эффективно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Использование элементов рядовых и крайних арок из трубчатых профилей существенно снижает их гибкость, значительно повышает

изгибную жесткость и устойчивость, что эффективно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Наличие бетона внутри внешнего пояса арок эффективно повышает их несущую способность, защищая как от внешних воздействий, так и от местного изгиба стенок трубчатого профиля, что действительно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Использование предварительно напряженных затяжек в арках из стальных канатов обеспечивает эффективное восприятие распорных усилий между опорами арок от внешних воздействий, что значительно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Бетон в замкнутом контуре стального трубчатого профиля поясов арок имеет улучшенные механические характеристики, в том числе прочность, а также практически не имеет усадки, что эффективно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Жесткие ванты, затяжки и оттяжки, выполненные предварительно напряженными, обеспечивают изменение усилий во всех арках

и жестких вантах, что эффективно уменьшает материалоемкость металлической конструкции.

Обычно расход стали в металлических каркасах зданий и сооружений с пространственными конструкциями покрытия больших пролетов составляет 80–120 кг/м² в зависимости от типа конструкции, кровли и климатических нагрузок. Для определения эффективности разработанного конструктивного решения покрытия было рассчитано два варианта каркаса здания:

- металлический каркас с седловидным пространственным покрытием и оттяжками;
- комбинированная сталебетонная конструкция каркаса с седловидным пространственным покрытием, оттяжками и затяжками.

Расчет вариантов был выполнен с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD Office по действующим нормативным документам для стальных и сталежелезобетонных конструкций [18, 19]. В качестве исходных данных для расчета сооружения приняты параметры: пролет — 70 м, длина — 114 м, высота в коньке в торце сооружения — 21 м, высота в коньке в середине сооружения — 15 м, шаг рядовых арок — 12 м, шаг торцевых арок — 9 м; шаг вант — от 2 до 3,1 м. Месторасположение — Волосово (Ленинградская область). Арки — стальные, сквозного сечения высотой $h = 3,0$ м из круглых труб по ГОСТ 54157-2010, ванты — стальные, двутаврового сечения 40Ш1

по ГОСТ 57837-2017, оттяжки — стальные из канатов 15 К7 по ГОСТ 13840-68, затяжки — стальные, двутаврового сечения 60Ш2 по ГОСТ 54157-2010.

Во втором варианте каркаса сооружения арки приняты сталебетонными сквозного сечения высотой $h = 3,0$ м из круглых труб по ГОСТ 54157-2010 с заполнением бетоном класса прочности В30 (рис. 1).

Расчеты подобных конструкций требуют индивидуального подхода, в частности при учете ветровых воздействий, имеющих особое распределение аэродинамических коэффициентов по ограждающим поверхностям [20].

В результате выполненных расчетов (см. табл. и рис. 4) выявлено:

- комбинированная сталебетонная конструкция каркаса с седловидным пространственным покрытием в сравнении с металлическим каркасом дает экономию расхода стали (на 16%);
- комбинированная сталебетонная конструкция каркаса с седловидным пространственным покрытием в сравнении с металлическим каркасом имеет более высокую жесткость (на 8%);
- комбинированная сталебетонная конструкция каркаса с седловидным пространственным покрытием в сравнении с металлическим каркасом обладает большей стойкостью

ТАБЛИЦА. Сравнение вариантов рам каркаса здания

Тип конструкции	Сечения элементов	Расход стали, т (%)	Деформации, мм (%)
Металлическая конструкция покрытия	Арки — тр. 325,0 × 20,0 Ванты — дв. 40Ш1 Оттяжки — канат 15 К7 Затяжки — 60Ш2	1176,93 (100)	58,53 (100)
Комбинированная сталебетонная конструкция покрытия	Арки — тр. 325,0 × 8,0 Ванты — дв. 40Ш1 Оттяжки — канат 15 К7 Затяжки — дв. 60Ш2	991,01 (84)	53,59 (92)

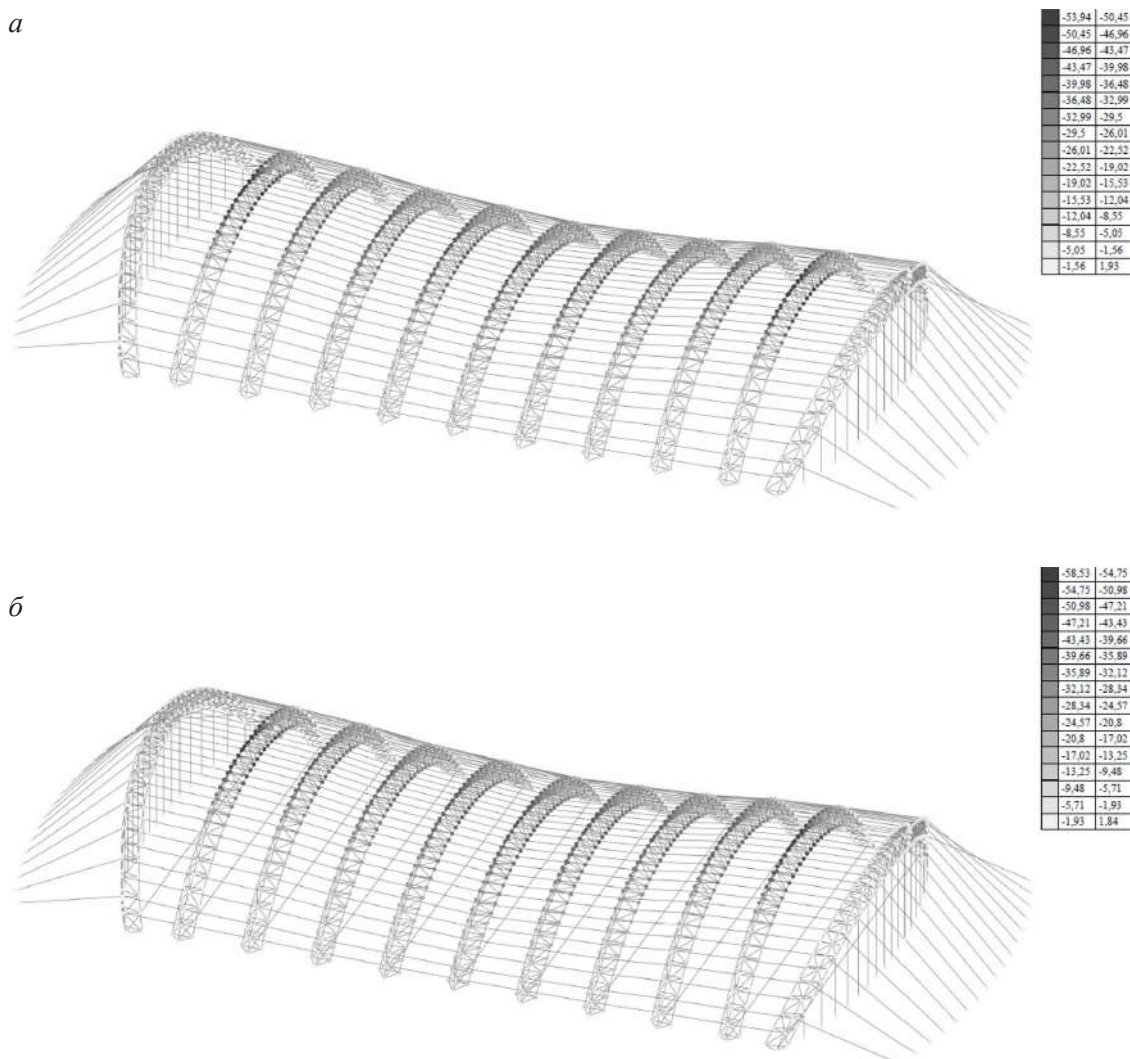


Рис. 4. Деформированные схемы рассчитанных вариантов каркаса от комбинации приложенных нагрузок, мм: *a* — металлический каркас; *б* — комбинированная сталебетонная конструкция каркаса

к прогрессирующему обрушению при действии особых нагрузок.

Заключение

Разработана инновационная комбинированная конструкция седловидного покрытия здания (сооружения), которая состоит из системы параллельно расположенных арок с возрастающей стрелой подъема к торцам сооружения, системы параллельно распо-

ложенных жестких вант, перпендикулярных аркам и жестко соединенных с ними в местах пересечения с образованием большепролетного седловидного пространственного покрытия. Арки крайних рядов (торцевые арки) наклонены наружу сооружения и подкреплены стойками фахверка. Жесткие ванты, провисающие к центру сооружения, запроектированы из стальных двутавров с предварительным напряжением.

Рядовые арки — сквозного поперечного сечения с применением трубчатых профилей, состоящие из двух внутренних поясов и одного внешнего пояса, заполненного бетоном. Все пояса соединены между собой стойками и раскосами. Базы арок соединены затяжками из стальных двутавров или канатов с предварительным напряжением для восприятия распорных усилий арок, а торцевые арки, воспринимающие распорные усилия от вант, подкрепляются оттяжками из стальных предварительно напряженных канатов. При этом участки пересечения вант и арок снабжены опорными столиками, обеспечивающими удобство монтажа и крепления элементов. Предлагаемая конструкция каркаса здания имеет сниженный расход стали на 16 % при повышении жесткости на 8 % в сравнении с известными конструкциями металлических каркасов большепролетных зданий. Комбинированная конструкция седловидного покрытия здания применима в вокзальных комплексах, навесах, дебаркадерах и других сооружениях на транспорте.

Список источников

1. Веселов В. В. Проблемы расчетов строительных конструкций с применением программных комплексов // 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., Абу-Хасан М. С. Повреждаемость и резервы несущей способности каркасов промышленных зданий // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 3 (1051). С. 56–58.
3. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения.
4. Веселов В. В. Безопасная эксплуатация зданий и сооружений на транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, № 1. С. 161–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171
5. Веселов В. В., Супонева Ю. Е. Инновационное проектирование зданий и сооружений с учетом особых нагрузок и воздействий // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы конференции. 2018. С. 74–77.
6. Веселов В. В., Козуб Ю. С. Проектирование покрытий одноэтажных зданий с применением сталежелезобетонных конструкций // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. С. 165–169.
7. Талантова К. В., Фисенко А. С. Совершенствование структурных покрытий общественных зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 5 (761). С. 31–40. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-761-5-31-40
8. Веселов В. В., Арещенко Т. С. Выбор конструктивных и объемно-планировочных решений планетариев // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции (Санкт-Петербург, 23 июня 2021 года). М.: Спутник+, 2021. С. 56–61.
9. Опанасенко Е. В. Эффективность применения сталебетонных конструкций в каркасах промышленных зданий // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т. 3. С. 355–360.
10. Висячее седловидное покрытие: патент № SU 222642 A1 (СССР). № 1154576/29 14 / Москалев Н. С.; заявл. 16.05.1967; опубл. 16.10.1968. МПК E04B 7/14.
11. Комбинированное купольное покрытие: патент № 2858562 C1 Российская Федерация / Веселов В. В., Грневич К. М., Харина А. В.; заявл. 24.09.2025; опубл. 18.03.2026; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный

университет путей сообщения Императора Александра I». МПК E04B 7/10, E04B 1/32.

12. Сталебетонная балка: патент № 2627810 C1 Российская Федерация. № 2016119481 / Егоров В. В., Веселов В. В.; заявл. 19.05.2016; опубл. 11.08.2017; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». МПК E04C 3/293, E04C 3/07, E04B 1/30.

13. Сталебетонная ферма: патент на полезную модель № 182163 U1 Российская Федерация. № 2018117051 / Веселов В. В.; заявл. 07.05.2018; опубл. 06.08.2018; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». МПК E04C 3/293.

14. Комбинированное седловидное покрытие: патент № 2844973 C1 Российская Федерация / Веселов В. В., Першина А. О.; заявл. 04.02.2025; опубл. 12.08.2025; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». МПК E04B 7/10, E04B 7/14.

15. Каркас одноэтажного здания повышенной стойкости к прогрессирующему обрушению: патент № 2840108 C1 Российская Федерация / Веселов В. В., Журавлева А. Н., Калинин А. А.; заявл. 18.07.2024; опубл. 19.05.2025; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». МПК E04B 1/30.

16. Каркас арочного здания: патент на полезную модель № 192327 U1 Российская Федерация.

№ 2019117818 / Веселов В. В., Козуб Ю. С.; заявл. 07.06.2019; опубл. 12.09.2019; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». МПК E04B 1/24, E04B 1/32.

17. Веселов В. В., Володченко Д. Г. Металлические конструкции высотных и большепролетных зданий и сооружений. Проектирование большепролетных покрытий зданий и сооружений: электронное учебное пособие. СПб.: Петерб. гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, 2025. 97 с.

18. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправкой, с Изменением № 1).

19. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования.

20. Сатанов А. А., Симонов А. В., Хазов П. А. Определение аэродинамических характеристик большепролетного здания экспериментальными методами // Строительная механика и конструкции. 2023. № 1 (36). С. 63–74. DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.007

Дата поступления: 20.05.2026

Решение о публикации: 27.06.2026

Контактная информация:

ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»;
veselov.1977@inbox.ru

Combined Design of a Long-Span Building

V. V. Veselov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Veselov V. V. Combined Design of a Long-Span Building // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 764–775. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-764-775 (In Russian)*

Abstract

Objective: to develop a combined design of a large-span building, including for use in transport, such as railway stations, canopies, embankments, stadiums, sports facilities, etc., which has increased rigidity, reliability, and resistance to progressive collapse while reducing material consumption. **Methods:** analysis of large-span structures, development of an innovative solution for the frame of a large-span building, and calculation of the frame using a software package. **Results:** known structures of long-span buildings and structures do not always have high rigidity, resistance to progressive collapse, and are often uneconomical in terms of material consumption. For the frames of buildings and structures with large spans, including those in the transport sector, metal structures with high strength and architectural expressiveness are mainly used. However, the use of classical solutions for metal structures for the frames of buildings and structures is very expensive. The Department of Building Structures, Buildings, and Structures at PGUPS is developing innovative structures using steel concrete. An innovative combined design of a saddle-shaped building (structure) on a rectangular or oval plan has been developed and calculated. This design consists of parallel arches in the direction of the object's width, with a variable lift that increases towards the ends of the object, and a series of parallel rigid cables in the direction of the object's length, which are connected to the arches at their intersection points, forming a saddle-shaped spatial large-span roof. The arches are made using tubular profiles, have a through section of 2 lower (internal) belts, 1 upper (external) belt filled with concrete, and a lattice. The arches at the ends of the object have an outward slope and are reinforced with half-timbered posts. The rigid cables are made of metal pre-stressed I-beams. The upper (external) belt of the end arches is fixed with pre-stressed ties, and the supporting parts of the arches are connected with pre-stressed ties. The proposed innovative design has been calculated, and the reduction in material consumption and increase in rigidity have been determined. **Practical significance:** the effectiveness of the use of combined steel-concrete structures in the frames of large-span buildings is established. The proposed building frame design has a reduced steel consumption of 16 % while increasing the rigidity by 8 % in comparison with the known designs of metal frames of large-span buildings. The combined design of the saddle-shaped roof can be used in railway stations, canopies, quays, and other transport facilities.

Keywords: long-span roofs, saddle-shaped roofs, buildings and structures, metal structures, combined structures, steel concrete, load-bearing capacity, rigidity, progressive collapse

References

1. Veselov V. V. Problemy raschetov stroitel'nykh konstruktsiy s primeneniem programmnykh kompleksov [Problems of Calculations of Building Structures Using Software Complexes], *Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy X nauchno prakticheskoi konferentsii* [Examination

of Buildings and Structures: Problems and Solutions: Proceedings of the 10th Scientific and Practical Conference], October 10–11, 2019 / pod red. A. V. Ulybina. St. Petersburg, Polytechnical University Publishing House, 2019, pp. 22–27. (In Russian)

2. Veselov V. V., Abu Hasan M. S. Povrezhdanost' i rezervy nesushchei sposobnosti karkasov

promyshlennykh zdaniy [Damageability and Reserves of Load-Bearing Capacity of Industrial Building Frames], *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki [Bulletin of Construction Equipment]*, 2022, no. 3 (1051), pp. 56–58. (In Russian)

3. 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. General Provisions]. (In Russian)

4. Veselov V. V. Bezopasnaya ekspluatatsiya zdaniy i sooruzheniy na transporte [Safe Operation of Buildings and Structures in Transport], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 161–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171 (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 pokrytij odnoetazhnykh zdaniy s primeneniem stalezhelezobetonnykh konstruksij [Design of Roofs of One-Story Buildings with Steel-Concrete Structures], *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXIX Vserossiyskoj nauchno tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the 79th All-Russian Scientific and Technical Conference]*, St. Petersburg, Petersburg State Transport University, 2019, pp. 165–169. (In Russian)

7. Talantova K. V., Fisenko A. S. Sovershenstvovanie strukturnykh pokrytij obshchestvennykh zdaniy [Improvement of Structural Roofs of Public Buildings], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*

[Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction], 2022, no. 5 (761), pp. 31–40. DOI: 10.32683/0536 1052 2022 761 5 31 40 (In Russian)

8. Veselov V. V., Areshchenko T. S. Vyborkonstruktivnykh i ob'emno planirovochnykh reshenij planetariyev [Choice of Structural and Spatial-Layout Solutions for Planetariums.], *Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno prakticheskoi internet konferentsii [Innovative Technologies in Construction and Geoecology: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Online Conference, St. Petersburg, June 23, 2021]*, Moscow, Sputnik+, 2021, pp. 56–61. (In Russian)

9. Opanasenko E. V. Effektivnost' primeneniya stalebetonnykh konstruksij v karkasakh promyshlennykh zdaniy [Efficiency of Using Steel-Concrete Structures in Industrial Building Frames], *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse, Sankt-Peterburg, 23 iyunya 2021 goda [Modernization and Scientific Research in the Transport Complex, St. Petersburg, June 23, 2021]*, 2013, vol. 3, pp. 355–360. (In Russian)

10. Moskalev N. S. Visyachie sedlovidnoe pokrytie [Suspended Saddle-Shaped Roof], Patent no. SU 222642 A1 (USSR), appl. May 16, 1967, publ. October 16, 1968 / IPC E04B 7/14 (In Russian)

11. Veselov V. V., Grenevich K. M., Kharina A. V. Russian Federation. Kombinirovannoe kupol'noe pokrytie [Combined Dome Roof], Patent no. 2858562 C1, appl. September 24, 2025, publ. March 18, 2026; applicant — Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. IPC E04B 7/10, E04B 1/32 (In Russian)

12. Egorov V. V., Veselov V. V. Stalebetonaya balka [Steel-Concrete Beam], Patent no. 2627810 C1, Russian Federation, appl. May 19, 2016, publ. August 11, 2017; applicant — Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. IPC E04C 3/293, E04C 3/07, E04B 1/30 (In Russian)

13. Veselov V. V. Stalebetonaya ferma [Steel-Concrete Truss], Utility Model Patent no. 182163 U1,

Russian Federation, appl. May 7, 2018, publ. August 6, 2018, applicant — Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. IPC E04C 3/293 (In Russian)

14. Veselov V. V., Pershina A. O. Kombinirovannoe sedlovidnoe pokrytie [Combined Saddle-Shaped Roof], Patent no. 2844973 C1, Russian Federation, appl. February 4, 2025, publ. August 12, 2025; applicant — Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. IPC E04B 7/10, E04B 7/14 (In Russian)

15. Veselov V. V., Zhuravleva A. N., Kalinin A. A. Karkas odnoetazhnogo zdaniya povyshennoi stoikosti k progressiruyushchemu obrusheniyu [Frame of a One-Story Building with Increased Resistance to Progressive Collapse], Patent no. 2840108 C1, Russian Federation, appl. July 18, 2024, publ. May 19, 2025; applicant — Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. IPC E04B 1/30 (In Russian)

16. Veselov V. V., Kozub Yu. S. Karkas arochnogo zdaniya [Frame of an Arched Building], Utility Model Patent no. 192327 U1, Russian Federation, appl. June 7, 2019, publ. September 12, 2019; applicant — Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. IPC E04B 1/24, E04B 1/32 (In Russian)

17. Veselov V. V., Volodchenko D. G. Metallicheskie konstruksii vysotnykh i bol'sheproletnykh zdaniy i sooruzhenij. Proektirovanie bol'sheproletnykh pokrytij zdaniy: elektronnoe uchebnoe posobie [Metal Structures of High-Rise and Large-Span Buildings and

Structures. Design of Large-Span Roofs of Buildings and Structures: A Electronic Textbook], Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2025, 97 p. (In Russian)

18. Stal'nye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II 23 81* [Steel Structures. Updated Edition of SNIIP II 23 81*, with amendment and modification no. 1]. Construction Regulations 16.13330.2017. (In Russian)

19. Konstruksii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya [Steel Concrete Structures. Design Rules], Construction Regulations 266.1325800.2016. (In Russian)

20. Satanov A. A., Simonov A. V., Khazov P. A. Opredelenie aerodinamicheskikh kharakteristik bol'sheproletnogo zdaniya eksperimental'nymi metodami [Determination of Aerodynamic Characteristics of a Large-Span Building by Experimental Methods], *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii* [Structural Mechanics and Constructions], 2023, no. 1 (36), pp. 63–74. DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.007 (In Russian)

Received: May 20, 2026

Accepted: June 27, 2026

Author's information:

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Construction structures, buildings and facilities”; veselov.1977@inbox.ru

УДК 66.063.8, 628.35

Методика расчета параметров устройств для перемешивания активного ила в зонах биоблока очистных сооружений высокой производительности

Д. С. Рабцевич¹, Н. Б. Марков¹, Д. А. Букарев²

¹ ООО «СтройИнжСистем», Россия, 198332, Санкт-Петербург, Брестский б-р, 8а

² ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», Россия, 191015, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 42

Для цитирования: Рабцевич Д. С., Марков Н. Б., Букарев Д. А. Методика расчета параметров устройств для перемешивания активного ила в зонах биоблока очистных сооружений высокой производительности // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 776–788. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-776-788

Аннотация

Цель: в российской инженерной практике отсутствует апробированная методика подбора перемешивающих устройств для сооружений биологической очистки, в том числе расчета мощности и других параметров. Ранее подобные характеристики определялись импортными заводами-изготовителями, но в текущей ситуации становится очевидной необходимость разработки отечественной методики расчета перемешивающих устройств в системах с активным илом, в том числе для технологий МБР-реакторов. Процесс перемешивания зависит от многих факторов: состава сточных вод, дозы (концентрации) ила, температуры, вязкости среды, геометрических параметров емкостей, высоты слоя воды, типа перемешивающего устройства, места размещения устройства в технологической схеме и многих других. Рядом исследователей проводились попытки разработать расчетную методику для подбора перемешивающих устройств в системах биологической очистки, но все они учитывали узкий диапазон факторов (область применения) и были неудобны в использовании. Российское программное обеспечение по подбору мешалок (перемешивающих устройств) в емкостях биологической очистки отсутствует. В данной статье предлагается новая методика расчета параметров устройств перемешивания активного ила в зонах биоблока очистных сооружений биологической очистки различных типов. **Методы:** расчетные формулы были подобраны с использованием расчетных методик мировых компаний — производителей современного перемешивающего оборудования с учетом уточненных данных, полученных при многолетней эксплуатации существующих очистных сооружений, и дополнены расчетами недостающих параметров, необходимых для проектирования. **Результаты:** разработана методика расчета и подбора перемешивающих устройств с определением полного перечня параметров для проектирования, в том числе с учетом расчетных коэффициентов рециркуляции, технологий с различной дозой (концентрацией) активного ила, приведены рекомендации по размещению перемешивающих устройств в емкостях различной конфигурации и объема, рекомендации по определению количества перемешивающих устройств. Разработанная методика соответствует требованиям СП 32.13330.2018 к расчету параметров очистных сооружений. **Практическая значимость:** результаты работы имеют значение для проектирования, поскольку упрощают подбор и обоснование перемешивающего оборудования, а также для реконструкции существующих сооружений при замене импортных перемешивающих устройств на отечественные.

Ключевые слова: перемешивающие устройства, биологическая очистка, биоблок, мешалки для МБР-реактора, параметры подбора, мощность устройства, методика расчета

В процессе проведения расчетов технологических параметров и выбора оборудования для канализационных очистных сооружений (КОС) одной из сложных задач является подбор оборудования для перемешивания иловой смеси в зонах аэротенка с глубоким удалением биогенных элементов или биоблока в случае применения технологии мембранного биореактора (МБР-технологии). Перемешивающие устройства при биологической очистке используются в зонах, где отсутствует подача воздуха. В настоящее время принято, что подбор перемешивающего оборудования (мешалок или преобразователей потока) в каждом конкретном случае производится индивидуально при помощи сертифицированного программного обеспечения производителя, учитывающего геометрические параметры сооружения, дозу активного ила, параметры поступающих сточных вод и прочие исходные данные. Зачастую программное обеспечение у проектировщиков и технологов отсутствует. Надеемся, что материалы данной статьи помогут техническим специалистам рассчитать параметры перемешивающих устройств для очистных сооружений сточных вод и самостоятельно подобрать оборудование по каталогам заводов-изготовителей. Разработанная методика соответствует требованиям СП 32.13330.2018 [1].

При использовании электромеханического оборудования для перемещения иловой смеси в неаэрируемых и аноксидных зонах очистных сооружений требуется определить технические характеристики перемешивающих устройств и их необходимое количество. С этой целью необходимо заранее произвести точный расчет объема биоблока с определением размеров рабочих зон.

Пример плана биоблока с анаэробной, аноксидной и аэрационной зонами показан на рис. 1.

Для создания напряжения сдвига и приведения в горизонтальное движение всего объема жидкости на практике очистных сооружений сточных вод используются мешалки или преобразователи потока пропеллерного типа, обеспечивающие циркуляцию иловой смеси со средней горизонтальной скоростью ($\omega_{см}$) в пределах от 0,2 до 0,3 м/с [2].

Средняя скорость, создаваемая перемешивающими устройствами, должна быть достаточной для того, чтобы удерживать частицы активного ила во взвешенном состоянии, обеспечивая однородность среды по всему объему резервуара.

Для расчета параметров перемешивающих устройств (рис. 2) принимаются следующие данные по биоблоку:

- ширина B_i и длина L_i i -й зон биоблока (ANA, ANOX и MBR);
- рабочая высота $H_{ББ}$;
- температура t и плотность ρ иловой смеси;
- динамическая вязкость иловой смеси μ .

Смоченный периметр i -й зоны $P_{зона i}$ определим по формуле:

$$P_{зона i} = 2 (H_{ББ} + B_i). \quad (1)$$

Строительная высота биоблока:

$$H_{ББ стр} = H_{ББ} + (0,3 - 0,5).$$

Эквивалентный диаметр $D_{эi}$ зоны биоблока рассчитывается по соотношению:

$$D_{эi} = 4 S_{зона i} / P_{зона i} = 2 B_i H_{ББ} / (H_{ББ} + B_i). \quad (2)$$

Расчетный диаметр D_{mi} перемешивающего устройства пропеллерного типа для i -й зоны (ANA, ANOX и MBR) биоблока определяется по известному соотношению [3], при

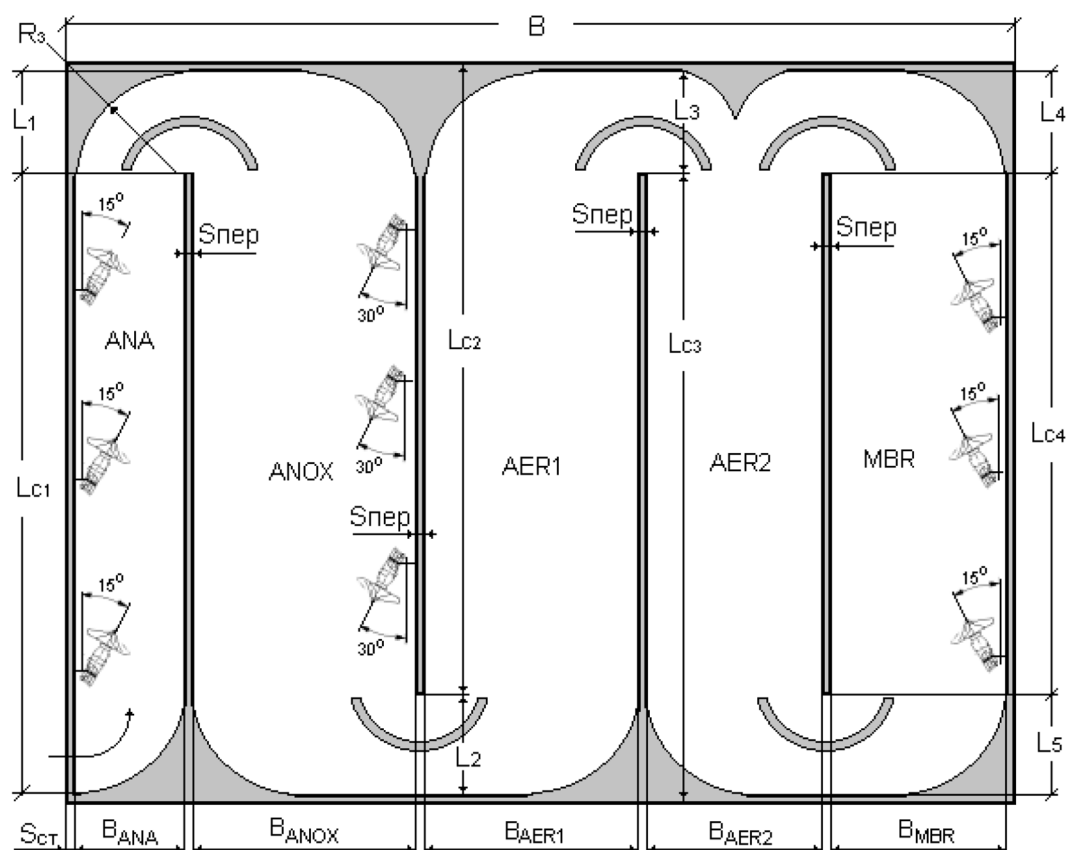


Рис. 1. План зон биоблока: ANA — анаэробная зона, ANOX — аноксидная зона, AER — аэрационная зона, MBR — зона мембранного биореактора; B_{ANA} — ширина анаэробной зоны, B_{ANOX} — ширина аноксидной зоны, B_{AER} — ширина аэробной зоны, B_{MBR} — ширина MBR-зоны, L_{ci} — длина стенки или перегородки i -й зоны, $S_{пер}$ — толщина перегородки

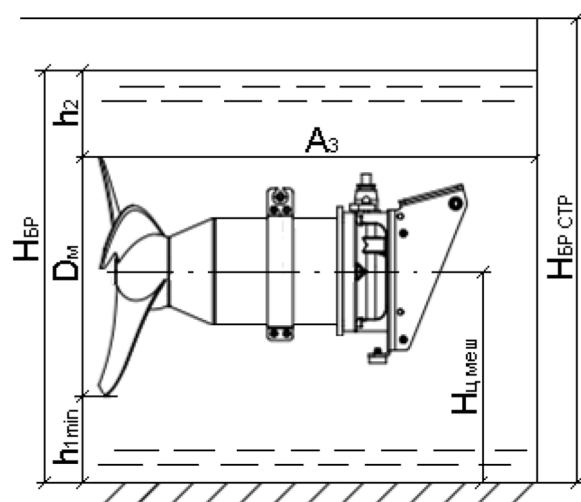


Рис. 2. Мешалка (вид сбоку)

условии что $H_{\text{ББ}} / B_i = 0,8 - 1$, а концентрация твердых веществ в перемешиваемой среде — не более 10%:

$$D_{\text{Mi}} = (0,25 - 0,33) D_{\text{зи}}.$$

При $H_{\text{ББ}} / B_i > 1$ и более высоких концентрациях следует принять $D_{\text{Mi}} = 0,33 D_{\text{зи}}$.

Оптимальные окружные скорости перемешивающих устройств пропеллерного типа [4] в зависимости от вязкости перемешиваемой среды приведены в табл. 1.

По рассчитанному значению D_{Mi} и заданной скорости (например, $\omega_{\text{м}} = 5,5$ м/с) вычисляем число оборотов привода перемешивающего устройства для каждой зоны биоблока:

$$n_{\text{Mi}} = \omega_{\text{м}} / \pi D_{\text{Mi}}, \quad (3)$$

$$L_{\text{стрANA}} = 3,5 (B_{\text{ANA}} - D_{\text{MANA}}), \text{ если } B_{\text{ANA}} < H_{\text{ББ}},$$

$$L_{\text{стрANA}} = 3,5 (H_{\text{ББ}} - D_{\text{MANA}}), \text{ если } B_{\text{ANA}} > H_{\text{ББ}}, \quad (4)$$

$$L_{\text{стрANOX}} = 3,5 (B_{\text{ANOX}} - D_{\text{MANOX}}), \quad (5)$$

$$L_{\text{стрMBR}} = 3,5 (B_{\text{MBR}} - D_{\text{MBR}}). \quad (6)$$

По данным некоторых производителей оборудования, в тех случаях, когда отношение длины i -й зоны к ее ширине равно или более 3, необходимы дополнительные, последовательно установленные перемешивающие устройства [5]. Расчетное количество X_{Mi} связано с минимальным расстоянием между мешалками l_{Mi} , а именно для зон:

- анаэробной $l_{\text{MANA}} \sim 2,5 B_{\text{ANA}}$;
- аноксидной $l_{\text{MANOX}} \sim 2,0 B_{\text{ANOX}}$;
- MBR $l_{\text{MBR}} \sim 2,0 B_{\text{MBR}}$.

Тогда количество мешалок X_{Mi} в зонах биоблока:

$$- X_{\text{MANA}} = L_{\text{ANA}} / (2,5 B_{\text{ANA}}), \quad (7)$$

$$- X_{\text{MANOX(MBR)}} = L_{\text{ANOX(MBR)}} / (2,0 B_{\text{ANOX(MBR)}}). \quad (8)$$

Данное условие является предварительным, поскольку окончательное количество перемешивающих устройств в i -й зоне уточняется после вычисления удельной мощности приводов устройств, расположенных в данной зоне биореактора. Монтаж погружных мешалок следует осуществлять под углом минимум 15° к боковой стенке (рис. 3) для минимизации потерь вследствие трения смешивающихся струй о стенки резервуара. Необходимо также учитывать минимальное расстояние от края лопасти пропеллера до боковой стенки резервуара, равное $0,5 D_{\text{м}}$.

Зная смоченный периметр $P_{\text{зоны } i}$, диаметр D_{Mi} и число оборотов мешалки n_{Mi} , высоту, ширину и длину i -й зоны биоблока, определяем высоту установки центра мешалки:

$$H_{\text{цMi}} = H_{\text{ББ}} - D_{\text{Mi}}/2 - h_{\text{1min}}, \quad (9)$$

где $h_{\text{1min}} = 0,5$ м — минимальное расстояние пропеллера мешалки от дна.

Площадь лопастей мешалки:

$$S_{\text{pi}} = \pi D_{\text{Mi}}^2 / 4; \quad (10)$$

ТАБЛИЦА 1. Оптимальные окружные скорости перемешивающих устройств пропеллерного типа

Перемешивающее устройство	Вязкость среды, Па · с	Оптимальная окружная скорость ($\omega_{\text{м}}$), м/с
Пропеллерного типа	Менее 0,1	3,8–16
	0,1–4	3,8–10

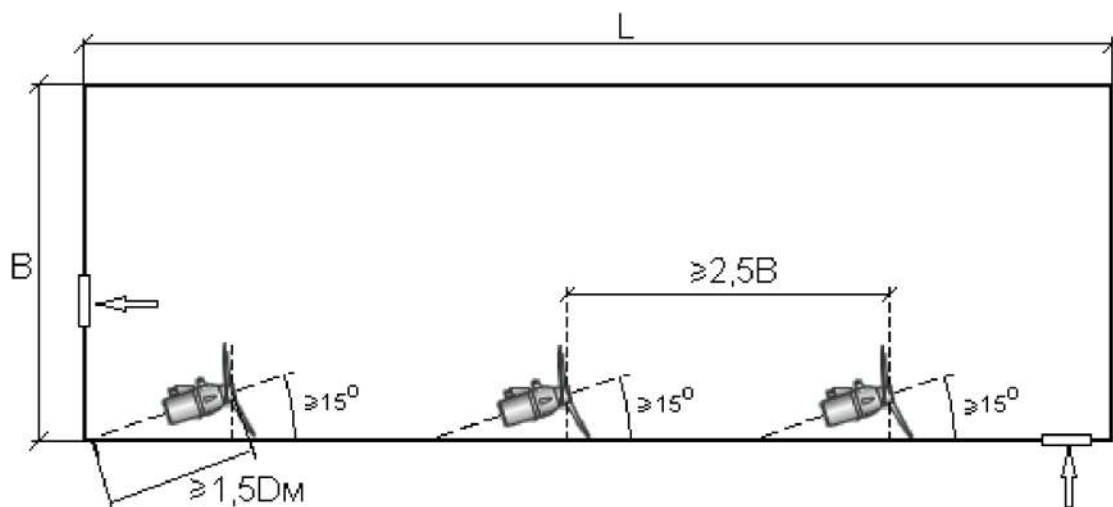


Рис. 3. Схема размещения нескольких мешалок в резервуаре (вид сверху)

площадь канала над мешалкой:

$$S_{Ei} = (H_{\text{цм}i} - D_{\text{м}i} / 2) B_i; \quad (11)$$

площадь течения без придонной зоны:

$$S_{ci} = (H_{\text{бб}} - h_{1\text{min}}) B_i; \quad (12)$$

живое сечение потока:

$$S_i = H_{\text{бб}} B_i. \quad (13)$$

В случае если биоблок изготовлен из бетона, удельная шероховатость стенок резервуара:

$$\varepsilon_{\text{уд}i} = \varepsilon / D_{\text{э}i}, \quad (14)$$

где ε — эквивалентная абсолютная шероховатость, для каналов из железобетона $\varepsilon = 0,05$ мм.

Зная динамическую вязкость μ , температуру t , концентрацию a и плотность ρ иловой смеси, определим ее кинематическую вязкость:

$$\nu = \mu \{ 1 + 2 a / \rho \cdot 100 [(1 + a / \rho \cdot 100) / (1 - a / \rho \cdot 100)]^2 \} / \rho, \quad (15)$$

где ν — кинематическая вязкость иловой смеси, $\text{м}^2/\text{с}$.

$$\mu = a_1 / (\varepsilon_1 + t); \quad (16)$$

μ — динамическая вязкость иловой смеси при температуре t , $\text{Па} \cdot \text{с}$;

$a_1 = 0,04131134$; $\varepsilon_1 = 21,30965215$;

ρ — плотность иловой смеси при температуре t :

$$\rho = 0,06 \rho_0 t - 0,0036 t^2;$$

$\rho_0 = 1000,3 \text{ кг}/\text{м}^3$ — базовое значение плотности.

По выбранному значению скорости течения иловой смеси $\omega_{\text{см}}$, известным геометрическим размерам зон биоблока и вычисленному значению ν определим критерий Re_i для i -й зоны, в которой размещено устройство ($Re > 4000$):

$$Re_i = Q_{cmi} D_{эi} / \nu S_i = 4Q_{cmi} / \nu P_{кани}, \quad (17)$$

где Q_{cmi} — расход циркулирующей иловой смеси через сечение i -й зоны, м³/с.

В общем случае возможна корреляция средней горизонтальной скорости течения смеси $\omega_{см}$ и производительности перемешивающего устройства Q_{mi} при известных данных i -й зоны [6]:

$$\omega_{см} = 4N_{Qmi} n_{mi} D_{mi} / (\pi (1 + \sqrt{\alpha})). \quad (18)$$

Показатель расхода:

$$N_{Qmi} = Q_{mi} / n_{mi} D_{mi}^3, \quad (19)$$

где Q_{mi} — производительность перемешивающего устройства, м³/с.

Гидравлический канал, в котором установлено перемешивающее устройство, характеризуется α -величиной:

$$\alpha_i = f P_{кани} I_{экви} S_{Ei} / (2X_{mi} S_{ci} S_{pi}), \quad (20)$$

где f — коэффициент трения;

$I_{экви}$ — общая эквивалентная длина i -го канала.

$$I_{экви} = L_{экви} + L_i, \quad (21)$$

где $L_{экви}$ — эквивалентная длина канала.

$$L_{экви} = \xi_i D_{эi} / (4f_i), \quad (22)$$

где ξ_i — суммарный коэффициент потерь энергии для канала с отражательными перегородками;

f_i — коэффициент трения.

Значения коэффициента потерь для канала с отражательными перегородками следует вы-

бирать соответственно конструкции перегородок, показанных в табл. 2.

В соответствии с формулой Манадилли [7] коэффициент трения — f_i (при $4000 < Re < 10^8$ и $0 < \varepsilon_{уд} < 0,05$);

$$\frac{1}{\sqrt{f_i}} = -2 \log [\varepsilon_{уд} / 3,7 + 95 / (Re_i)^{0,983} - 96,82 / Re_i]. \quad (23)$$

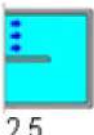
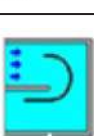
С учетом расчетного значения α по формуле (20) определим значение показателя расхода N_{QPi} , после чего расчетная производительность перемешивающего устройства:

$$Q_{mi} = N_{Qmi} n_{mi} D_{mi}^3. \quad (24)$$

В формулах (1–24) представлен алгоритм расчета параметров и количества перемешивающих устройств пропеллерного типа, устанавливаемых в различных зонах очистных сооружений сточных вод. На основании полученных расчетов появляется возможность выбора марки мешалки или преобразователя потока конкретного производителя требуемой производительности Q_m и диаметра лопасти D_m с учетом числа оборотов электропривода n_m , которое зачастую не совпадает с расчетными данными, но позволяет точно определить вид исполнения устройства: быстро- или низкооборотное.

С целью проверки корректности расчетов, проведенных по вышеприведенной методике, и в соответствии с данными фирмы «Грундфос» [5] для резервуаров объемом до 100 м³ величина удельного энергопотребления быстроходных мешалок для перемешивания иловой смеси находится на уровне 15–120 Вт/м³, а для резервуаров объемом более 100 м³ удельное энергопотребление низкооборотных мешалок или преобразователей потока иловой смеси находится на уровне 2–15 Вт/м³.

ТАБЛИЦА 2. Таблица значений коэффициента потерь для каналов с отражательными перегородками

№	Конструкция перегородки	Форма канала	Наличие зазора	Значение коэффициента потерь (ζ)	Обозначение
1	Вертикальная перегородка	Прямоугольный	Есть (широкий)	1,5	
2	Перегорodka с закруглением	Прямоугольный	Нет	0,6	
3	Наклонная перегородка	Прямоугольный	Переменный (W_l)	0,3–1,5	
4	Прямоугольная перегородка	Прямоугольный	Нет	2,5	
5	Закругленная перегородка	Прямоугольный	Нет	1,0	
6	Косая перегородка	Прямоугольный	Нет	0,8	
7	Округлый лоток	Округлый	Нет	0,5	
8	Карусельная перегородка	Округлый	Нет	1,1	
9	Комбинированная перегородка	Округлый	Частичный	1,4	

Итак, имея расчетные значения диаметра лопасти и производительности перемешивающего устройства с учетом числа оборотов, из каталогов производителей выбираем заводскую марку устройства с реальными техническими характеристиками: диаметр лопасти D_{mi} , число оборотов n_{mi} , производительность Q_{mi} , установленная P_{li} и потребляемая P_{2i} электрическая мощность привода. При этом удельное энергопотребление q_{mi} (Вт/м³) перемешивающих устройств, установленных в i -й зоне биоблока:

$$q_{mi} = \Sigma(P_{2i} X_{mi}) / V_{ББi}, \quad (25)$$

где P_2 — потребляемая электрическая мощность привода перемешивающего устройства, установленного в i -й зоне биоблока, Вт;

$V_{ББi}$ — объем i -й зоны биоблока, м³.

Вычисленное значение q_{mi} следует сравнить с вышеуказанными пределами удельного энергопотребления в зависимости от типа перемешивающих устройств (быстро- или низкооборотное). В случае если расчетное значение q_{mi} ниже указанного предела, следует увеличить количество перемешивающих устройств либо выбрать более мощный электропривод расчетного количества перемешивающих устройств в i -й зоне и автоматически повторить расчет до достижения требуемых пределов удельного энергопотребления. После выбора перемешивающего оборудования из каталогов завода-производителя определим реальный поток псевдосжиженной иловой смеси, создаваемый выбранными перемешивающими устройствами в i -й зоне биоблока:

$$Q_{i \text{ зоны}} = (X_{mi} Q_{mi}) + Q, \quad (26)$$

где Q — производительность очистных сооружений по исходной сточной воде, м³/ч.

Для достижения скорости витания частиц активного ила достаточно продольного перемещения (циркуляции) иловой смеси на уровне 0,2–0,3 м/с, при этом оседания частиц ила на поверхность резервуара не происходит и циркуляция двухфазной субстанции достаточна для осуществления процесса перемешивания иловой смеси в биоблоке. Тогда кратность циркуляции иловой смеси в зоне биоблока определяется:

$$K_{Ri} = Q_{i \text{ зоны}} / Q. \quad (27)$$

В материалах исследования [8] приведены графики зависимости коэффициента рециркуляции K_R в зависимости от длины аэротенка и времени пребывания T при продольной циркуляции иловой смеси со скоростью 0,3 м/с, достаточной для поддержания иловой смеси во взвешенном состоянии в случае резервуаров без аэрации иловой смеси (рис. 4). В реальных условиях отмечено, что при скорости иловой смеси 0,3 м/с объем продольной циркуляции в 21,6–162 раза превышает циркуляцию исходного потока сточных вод в анаэробных зонах.

В случае мембранного биореактора коэффициент рециркуляции K_R определяется без учета влияния внешнего контура рециркуляции возвратного ила, поскольку вторичные отстойники не требуются:

$$K_R = 1 + Q_R / Q,$$

где Q , Q_R — расход исходных сточных вод и продольного рецикла иловой смеси, соответственно.

Для снижения количества нитратов в очищенной сточной воде в любой схеме исполнения биоблока необходимо обеспечивать внутреннюю рециркуляцию нитратов из аэробной

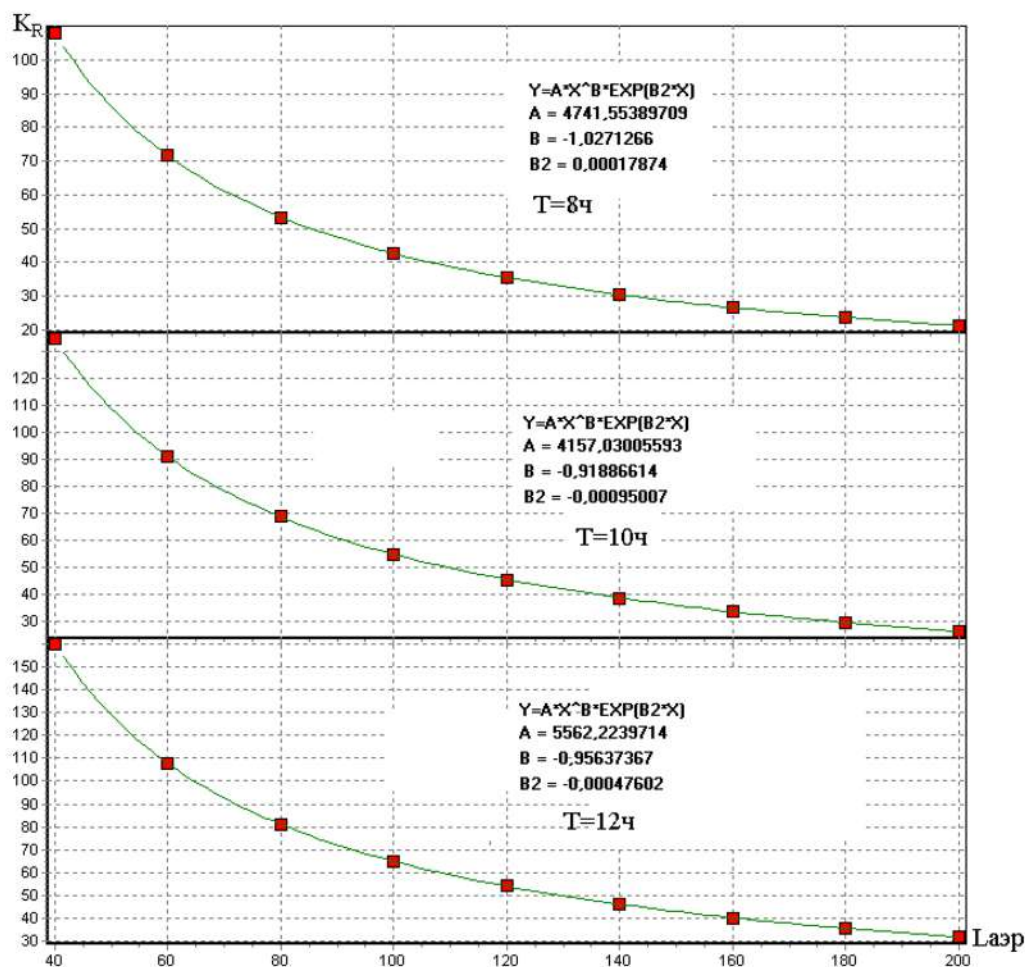


Рис. 4. Зависимость коэффициента рециркуляции K_R от длины резервуара и времени пребывания в нем иловой смеси при скорости продольной рециркуляции 0,3 м/с

зоны в аноксидную с целью создания нитратного рецикла. Кроме того, указанный способ рециркуляции иловой смеси использован в анаэробных зонах биоблока с целью повышения эффективности биологического удаления азота и фосфора.

В подтверждение сказанного приводим результаты выбора мешалок двух фирм — производителей перемешивающего оборудования в сравнение с расчетными данными, выполненными по представленной методике (табл. 3). Краткие исходные данные: очистка городских сточных вод, производительность сооруже-

ния — 45 000 м³/ч, МБР-технология, рабочая длина биореактора — 90 000 мм, рабочая высота биореактора — 5800 мм, план биореактора показан на рис. 5.

Заключение

В статье представлена новая методика расчета параметров устройств для перемешивания активного ила в зонах биоблока очистных сооружений высокой производительности. Расчет параметров оборудования по предложенной методике позволяет техническим специалистам самостоятельно подбирать мешалки или

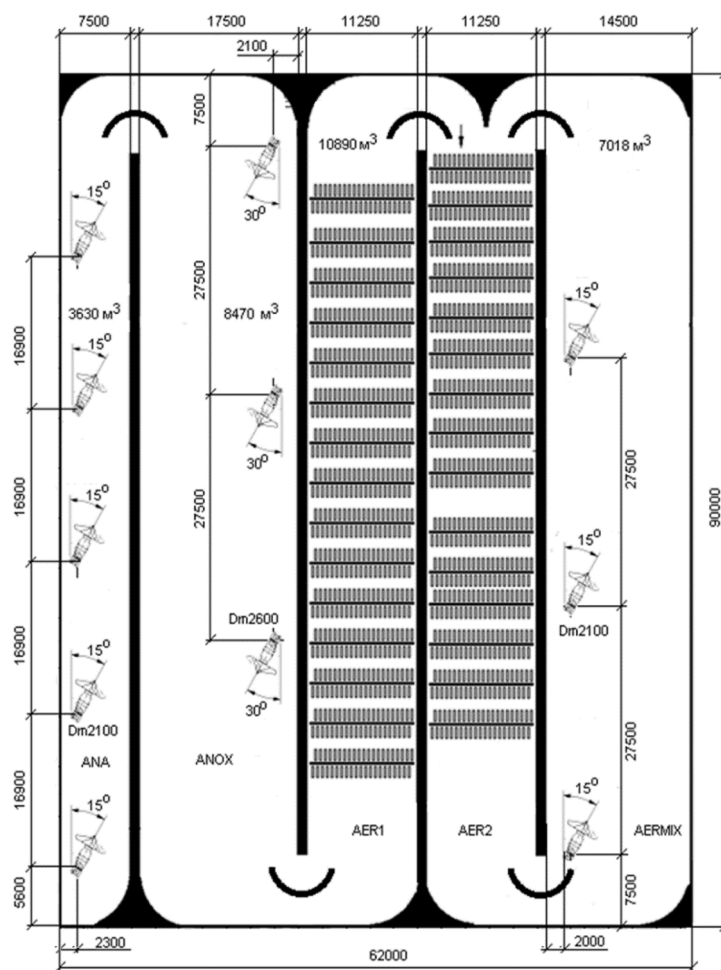


Рис. 5. План биореактора для сравнительных расчетов

преобразователи потока по каталогам заводов-изготовителей, что значительно упрощает процесс проектирования новых сооружений для очистки сточных вод.

Список источников

1. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. Свод правил (актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85). М.: Минстрой России, 2019.
2. Баженов В. И. Комплексная рециркуляционная модель биохимических процессов аэробной биологической очистки: дис. ... докт. техн. наук. Щелково, 2009. 445 с.
3. Иванец В. Н., Лобасенко Б. А. Методы интенсификации гидромеханических процессов: учебное пособие. Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2003. 84 с.
4. Машины и аппараты химических производств: примеры и задачи: учебное пособие / И. В. Доманский [и др.]. Л.: Машиностроение. Лен. отд., 1982. 384 с.
5. Рекомендации по размещению перемешивающих устройств в сооружениях водоотведения. М.: ООО «Грундфос», 2006. 110 с.
6. Prediction of Mean Circulation Velocity in Oxidation Ditch / S. Simon [et al.] // Environmental Technology. 2001. Vol. 22. Pp. 195–204.

ТАБЛИЦА 3. Результаты выбора мешалок двух фирм — производителей перемешивающего оборудования в сравнении с расчетными данными, выполненными по представленной методике

Наименование зоны	Наименование показателя	Расчетные данные по методике	Каталожные данные фирмы-производителя (1)	Каталожные данные фирмы-производителя (2)
Анаэробная зона объемом 3630 м ³ шириной 7,5 м	Диаметр лопасти D_m , мм	1700–2000	1800	2100
	Число оборотов привода n_m , об./мин.	58	50,7	55
	Установленная мощность P_1 , кВт	–	2,76	3,5
	Потребляемая мощность P_2 , кВт	–	2,6	2,6
	Количество X_m , шт.	5	5	5
	Удельная электрическая мощность q_m , Вт/м ³	–	3,80	4,82
	Тяга F_m , Н	–	1880	1740
	Расход Q_m , м ³ /ч	5351	5568	–
	Кратность циркуляции $K_{Ц}$	17	15	–
Аноксидная зона объемом 8470 м ³ шириной 17,5 м	Диаметр лопасти D_m , мм	2200–2680	2660	2600
	Число оборотов привода n_m , об./мин.	40	38,8	43
	Установленная мощность P_1 , кВт	–	7,4	5,8
	Потребляемая мощность P_2 , кВт	–	6,5	4,5
	Количество X_m , шт.	3	3	3
	Удельная электрическая мощность q_m , Вт/м ³	–	2,62	2,05
	Тяга F_m , Н	–	5650	4250
	Расход Q_m , м ³ /ч	11 775	14 264	–
	Кратность циркуляции $K_{Ц}$	20	23	–
Зона МБР (AERMIX) объемом 7018 м ³ шириной 14,5 м	Диаметр лопасти D_m , мм	2100–2500	2300	2100
	Число оборотов привода n_m , об./мин.	46	34,1	54
	Установленная мощность P_1 , кВт	–	5,2	5,8
	Потребляемая мощность P_2 , кВт	–	4,0	4,9
	Количество X_m , шт.	3	3	3
	Удельная электрическая мощность q_m , Вт/м ³	–	2,22	2,48
	Тяга F_m , Н	–	3144	3500
	Расход Q_m , м ³ /ч	9578	9200	–
	Кратность циркуляции $K_{Ц}$	16	15	–
Суммарная потребляемая электрическая мощность, кВт			44,5	41,2

7. Brkić D. Review of Explicit Approximations to the Colebrook Relation for Flow Friction // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011. Vol. 77, no. 1. Pp. 34–48. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.02.006

8. Баженов В. И. Принцип продольной рециркуляции в аэротенках карусельного типа // Водоснабжение и водоотведение. 2013. № 5–6. С. 90–100.

Дата поступления: 08.06.2026

Решение о публикации: 31.07.2026

Контактная информация:

РАБЦЕВИЧ Дмитрий Сергеевич — коммерческий директор ООО «СтройИнжСистем»; chief@stroyingsystem.ru

МАРКОВ Николай Борисович — кандидат техн. наук, главный инженер ООО «СтройИнжСистем»; markov_nb@mail.ru

БУКАРЕВ Дмитрий Александрович — главный инженер проекта ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»; bukarev.dmitri.a@mail.ru

The Method of Calculating the Parameters of Activated Sludge Mixing Devices in the Bioblock Areas of High-Performance Wastewater Treatment Plants

D. S. Rabtsevich¹, N. B. Markov¹, D. A. Bukarev²

¹ Stroyinzhsystem LLC, 8a Brestskiy blvd., St. Petersburg, 198332, Russia

² SUE Vodokanal of Saint Petersburg, 42 Kavalergardskaya st., St. Petersburg, 191015, Russia

For citation: Rabtsevich D. S., Markov N. B., Bukarev D. A. The Method of Calculating the Parameters of Activated Sludge Mixing Devices in the Bioblock Areas of High-Performance Wastewater Treatment Plants // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 776–788. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-776–788 (In Russian)

Abstract

Objective: in Russian engineering practice, there is no proven methodology for selecting mixing devices for biological treatment facilities (including calculating power and other parameters). Previously, such characteristics were determined by imported manufacturers, but in the current situation it becomes obvious that it is necessary to develop a domestic methodology for calculating mixing devices in activated sludge systems (including for ICBM reactor technologies). The mixing process depends on many factors (wastewater composition, sludge dose (concentration), temperature, viscosity of the medium, geometric parameters of the tanks, height of the water layer, type of mixing device, location of the device in the technological scheme, and many others. A number of researchers have attempted to develop a computational methodology for selecting mixing devices in biological purification systems, but all of them took into account a narrow range of factors (field of application) and were not convenient to use. There is no Russian software for the selection of agitators (mixing devices) in biological treatment tanks. This article proposes a new method for calculating the parameters of activated sludge mixing devices in the bioblock zones of biological treatment plants of various types. **Methods:** the calculation formulas were selected using the calculation methods of global manufacturers of modern mixing equipment, taking into account the updated data obtained during the long-term operation of existing wastewater treatment plants and supplemented with calculations of missing parameters necessary for design. **Results:** a methodology has been developed for calculating and selecting mixing devices with the definition of a complete list of parameters for design (including taking into account the calculated recirculation coefficients, technologies with different doses (concentrations) of activated sludge, recommendations are given for the placement of mixing devices in containers of various configurations and volumes, recommendations for determining the

number of mixing devices. The developed methodology meets the requirements of SP 32.13330.2018 for calculating the parameters of wastewater treatment plants. **Practical significance:** the results of the work are important for design, as they simplify the selection and justification of mixing equipment, as well as for the reconstruction of existing structures (when replacing imported mixing devices with domestic ones).

Keywords: mixing devices, biological purification, bioblock, agitators for an ICBM reactor, selection parameters, device power, calculation method

References

1. SP 32.13330.2018 Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Svod pravil (aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.04.03-85) [SP 32.13330.2018 Sewage. External Networks and Facilities. Code of Practice (Updated Edition of SNiP 2.04.03-85)], Moscow, Ministry of Construction of the Russian Federation, 2019. (In Russian)

2. Bazhenov V. I. Kompleksnaya recirkulyacionnaya model biohimicheskikh processov aerobnoj biologicheskoy ochistki [Comprehensive Recirculation Model of Biochemical Processes of Aerobic Biological Treatment], Doctor of Technical Sciences diss., Shchelkovo, 2009, 445 p. (In Russian)

3. Ivanec V. N., Lobasenko B. A. Metody intensifikatsii gidromekhanicheskikh processov: uchebnoe posobie [Methods for Intensifying Hydromechanical Processes: A Textbook], Kemerovo Technological Institute of Food Industry, 2003, 84 p. (In Russian)

4. Domanskij I. V., et al. Mashiny i apparaty himicheskikh proizvodstv: primery i zadachi: uchebnoe posobie [Machines and Apparatuses of Chemical Production: Examples and Problems: A Textbook], Leningrad, Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1982, 384 p. (In Russian)

5. Rekomendatsii po razmeshcheniyu peremeshivayushchih ustroystv v sooruzheniyah vodoootvedeniya [Recommendations for the Placement of Mixing Devices

in Wastewater Facilities], Moscow, LLC "Grundfos", 2006, 110 p. (In Russian)

6. Simon S., et al. Prediction of Mean Circulation Velocity in Oxidation Ditch, *Environmental Technology*, 2001, vol. 22, pp. 195–204.

7. Brkić D. Review of Explicit Approximations to the Colebrook Relation for Flow Friction, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, vol. 77, no. 1, pp. 34–48. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.02.006

8. Bazhenov V. I. Princip prodolnoy recirkulyatsii v aerotenkah karuselnogo tipa [The Principle of Longitudinal Recirculation in Carousel-Type Aeration Tanks], *Vodosnabzhenie i vodoootvedenie [Water Supply and Sanitation]*, 2013, no. 5–6, pp. 90–100. (In Russian)

Received: June 08, 2026

Accepted: July 31, 2026

Author's information:

Dmitrij S. RABTSEVICH — Commercial Director of Stroyinzhsystem LLC; chief@stroyingsystem.ru
Nikolaj B. MARKOV — PhD in Engineering, Chief Engineer of Stroyinzhsystem LLC; markov_nb@mail.ru

Dmitrij A. BUKAREV — Chief Engineer of the Project of SUE Vodokanal of St. Petersburg; bukarev.dmitri.a@mail.ru

УДК 624.042.5

Математическое обоснование промерзания обделки шахтного ствола

Ю. Г. Барабанщиков¹, А. А. Сокорнов², А. Н. Коньков², Ю. А. Филонов²,
А. Л. Новиков², Е. Г. Козин³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

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

³ ГУП «Петербургский метрополитен», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 28

Для цитирования: Барабанщиков Ю. Г., Сокорнов А. А., Коньков А. Н., Филонов Ю. А., Новиков А. Л., Козин Е. Г. Математическое обоснование промерзания обделки шахтного ствола // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 789–800. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-789-800

Аннотация

Разработана конструкция утепления шахтного ствола пеностеклобетонной рубашкой, обеспечивающей непромерзание грунта в течение сезонного периода воздействия отрицательной температуры на внутреннюю поверхность пеностеклобетонной теплоизоляции. **Цель** данной статьи — получение математической зависимости температуры на наружной поверхности обделки шахтного ствола от времени действия отрицательной температуры воздуха в шахте и тепловых характеристик конструкции. **Методы:** аналитические решения задачи нестационарной теплопроводности для полубесконечного тела в комбинации с численными решениями методом конечных элементов системы, включающей в себя грунтовой массив, обделку шахтного ствола с пеностеклобетонной облойкой и нагрузку от конвекции (потока холодного воздуха). **Результаты:** получены аналитические формулы для расчета времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных или железобетонных тюбингов с рубашкой из пеностеклобетона. Построены соответствующие этим формулам номограммы для определения времени промерзания шахтных стволов в зависимости от толщины рубашки из пеностеклобетона и температуры воздуха. **Практическая значимость:** результаты исследования позволяют расширить область применения технологии капитального ремонта шахт с рубашкой из пеностеклобетона на другие регионы страны с учетом их климатических особенностей.

Ключевые слова: вентиляционные стволы, метрополитен, грунтовой массив, метод конечных элементов, пеностеклобетон

Введение

В настоящее время на линиях Петербургского метрополитена эксплуатируются 140 стволов вентиляционных шахт, 76 из которых являются станционными, остальные 64 — перегонными. Согласно имеющимся данным, 80 % всех стволов вентиляционных

шахт Петербургского метрополитена находятся в режиме эксплуатации более 30 лет, из них 30 % — более 50 лет.

Вентиляционные стволы, расположенные на перегонах метрополитена, в зимний период работают в режиме притока свежего воздуха, что обуславливает одну из самых

острых проблем эксплуатации стволов вентиляционных шахт — промерзание строительной конструкции. Температура наружного воздуха в зимний период может опускаться до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, что приводит к промерзанию как обделки, так и грунтов по ее контуру.

Промерзание обводненных грунтов четвертичных отложений в заобделочном пространстве вызывает значительные дополнительные нагрузки на обделку от морозного пучения замерзающей воды. Как следствие, проявляются интенсивный износ конструкции обделки вентиляционного ствола, деформации и повреждение тюбингов вплоть до их разрушения и выпуска в ствол воды и грунтовых масс, то есть различные аварийные ситуации. Ухудшает условия работы конструкции и знакопеременный температурный режим, так как в течение зимнего периода промерзание-оттаивание обделки может проходить многократно.

Под действием знакопеременных температур разрушение обделки может происходить по-разному в зависимости от ее материала. Под действием расширяющегося льда чугунные тюбинги могут хрупко раскалываться на отдельные фрагменты, причем давление льда может быть настолько сильным, что тюбинги разрушаются не только по самому тонкому элементу конструкции (по спинке), но даже по кольцевым и радиальным бортам. Математическое обоснование этому процессу было приведено в [1]. При деформировании железобетонных тюбингов происходит разрушение бетона начиная с участков болтовых соединений, после чего куски бетона, как правило, не отделяются, а повисают на арматурном каркасе.

В результате этих процессов давление от расширяющегося льда снижается, после чего деформации обделки прекращаются или развиваются во времени циклически. Как следствие, подобные дефекты приводят к нарушению ги-

дроизоляции обделки и к значительным водопритокам в тоннельные сооружения [2–4].

Явление промерзания заобделочного пространства с последующим обледенением существенно снижает параметры и качественные характеристики надежности и безопасности строительных конструкций. А скопления льда, образующиеся в пространстве шахты, представляют собой опасность для работников метрополитена [5–8].

В последние годы коллективом кафедры «Тоннели и метрополитены» при участии кафедр «Инженерная химия и естествознание», «Высшая математика» и ГУП «Петербургский метрополитен» были выполнены инновационные исследования в области создания конструктивно-теплоизоляционных рубашек из пеностеклобетона при капитальном ремонте вентиляционных шахт метрополитена [9–11]:

- на математических моделях определены требуемые параметры по теплопроводности и прочностным характеристикам пеностеклобетона для выполнения теплоизоляционной железобетонной рубашки (обоймы);
- произведен подбор составов пеностеклобетона, обеспечивающих функцию эффективной теплоизоляции с одновременным конструкционным усилением существующей обделки;
- на натурной физической модели исследована эффективность теплоизоляционной железобетонной рубашки и технология ее устройства;
- проведены натурные исследования (мониторинг температурного режима) комбинированной обделки ствола, обладающей теплоизоляционными свойствами, на опытном объекте — в стволе вентшахты ВШ-04.

Актуальным направлением развития технологии реновации обделок шахтных стволов

с применением пеностеклобетона является нахождение математической зависимости температуры на наружной поверхности обделки шахтного ствола от времени действия отрицательной температуры воздуха в шахте и тепловых характеристик конструкции. Практическим результатом применения такой зависимости является распространение данной технологии на другие регионы страны с учетом их климатических условий.

Цель работы достигается решением следующих задач:

- вывести формулу времени промерзания обделки с пеностеклобетонной рубашкой;
- уточнить коэффициент B по 3D МКЭ-модели шахты в Midas GTS NX;
- построить номограммы времени промерзания по толщине рубашки и температуре воздуха;
- оценить применение формулы и номограмм для разных климатических регионов и требований к утеплению.

Построение математической зависимости

Для вывода математических зависимостей рассмотрим принципиальную схему участка ствола (рис. 1). Материал обделки — чугунные или железобетонные тубинги.

Теплотехнические характеристики материалов представлены в табл.

Приведенные значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости неоднородного слоя определялись по формулам:

$$\lambda_{\text{пр}} = (\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2) / S, \quad (1)$$

$$c\gamma_{\text{пр}} = (c_1 \gamma_1 S_1 + c_2 \gamma_2 S_2) / S, \quad (2)$$

где S — суммарная площадь теплообмена неоднородного слоя, состоящего из элементов:

1 — материал тубингов;

2 — пеностеклобетон;

$S_i, \lambda_i, c_i, \gamma_i$ — соответственно площадь, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность каждого элемента.

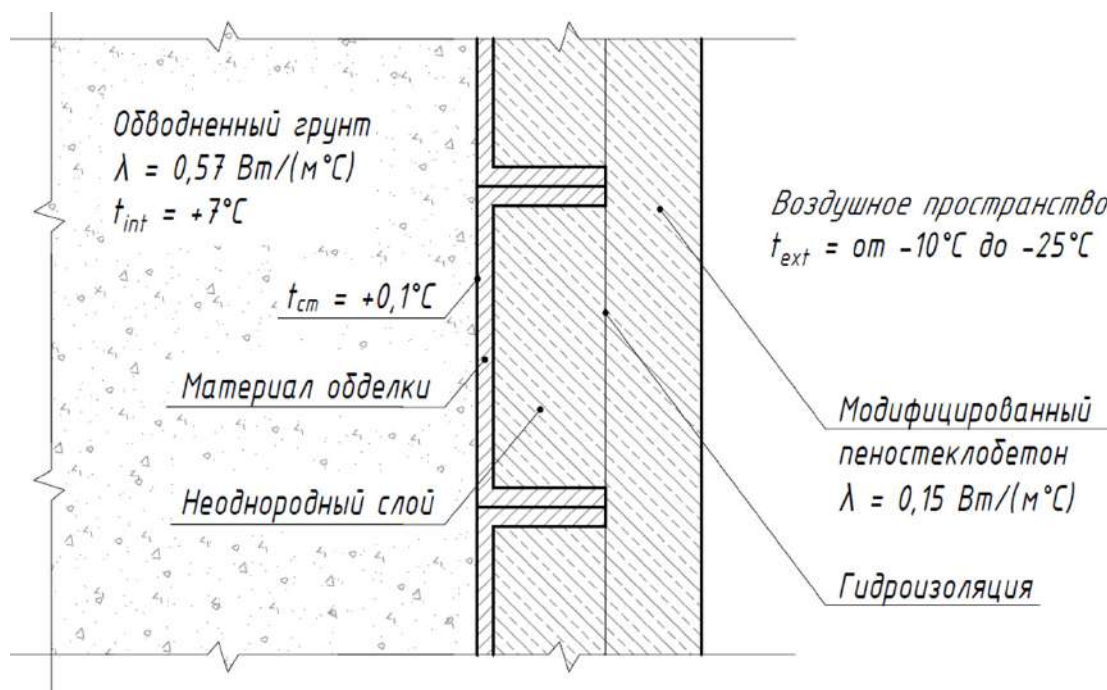


Рис. 1. Разбиение конструкции на расчетные слои

ТАБЛИЦА. Теплотехнические характеристики материалов

	Материал	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·°С)	Плотность, γ , кг/м³	Приведенная теплоемкость $c\gamma$, кДж/(м³·°С)	Коэффициент температуропроводности материала a , м²/сут.	Толщина слоя δ , м	Термическое сопротивление R , м²·°С/Вт
1	Обводненный грунт (вода)	0,57	4 190	1000	4190	0,0118	—	—
2.1	Сборные чугунные тубинги	70	540	7800	4190	1,4359	0,05	0,0007
2.2	Сборные железобетонные тубинги	1,80	840	2500	2100	0,0741	0,17	0,09
3.1	Неоднородный слой (чугун и пеностеклобетон)	13,77	—	—	1578	0,7540	0,15	0,01
3.2	Неоднородный слой (ж/б и пеностеклобетон)	0,94	—	—	1497	0,0543	0,23	0,24
4	Гидроизоляция на основе полимочевины	0,21	120	1000	120	0,1512	0,003	0,01
5	Пеностеклобетон	0,15	840	1120	940	0,0138	0,3	2,00

Примечание: коэффициенты температуропроводности рассчитаны по формуле (7) с учетом суточного масштаба времени.

Согласно теории теплопроводности зависимость относительной избыточной температуры $\theta_{ст}$ на контакте «обделка — грунт» от времени в безразмерном виде:

$$\theta_{ст} = \theta_0 - B \cdot \sqrt{F_0}, \quad (3)$$

где θ_0 — относительная избыточная температура на контакте «обделка — грунт» в на-

чальный момент времени $T_0 = 0$ сут, определяемая по формуле:

$$\theta_0 = 1 / \alpha_{int} / (\sum R_i + 1 / \alpha_{int} + 1 / \alpha_{ext}), \quad (4)$$

где α_{int} — коэффициент теплоотдачи для условий грунта и свободной конвекции грунтовой воды, принят равным 60 Вт/(м²·°С);

α_{ext} — коэффициент теплоотдачи на границе «воздух — пеностеклобетон», принят по СП 50.13330.2024 равным $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

ΣR_i — суммарное термическое сопротивление всех слоев без учета внутреннего и наружного теплообмена, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, при этом

$$R_i = \delta_i / \lambda_i, \quad (5)$$

где δ_i — толщина слоя конструкции, м;

λ_i — теплопроводность слоя конструкции, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

B — коэффициент теплообмена;

F_0 — безразмерный критерий Фурье, определяемый в общем виде по формуле:

$$F_0 = \alpha_t T / \delta^2, \quad (6)$$

где α_t — коэффициент температуропроводности конструкции $(\text{м}^2/\text{сут.})$, который будем определять по материалу тюбинга, то есть:

$$\alpha_t = 86\,400 \cdot \lambda / (c\gamma), \quad (7)$$

где $86\,400$ — переводной коэффициент масштаба времени (количество секунд в одних сутках);

λ , c , γ — соответственно теплопроводность $(\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}))$, удельная теплоемкость $(\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}))$ и плотность $(\text{кг}/\text{м}^3)$ слоя конструкции, расположенного со стороны грунта, то есть чугунного или железобетонного тюбинга;

T — время промерзания, сут;

δ — толщина конструкции, которая может быть представлена в виде эквивалентной толщины $\delta_{\text{экв}}$, то есть толщины эквивалентного однородного слоя, имеющего сопротивление теплопередаче, равного многослойной конструкции:

$$\delta_{\text{экв}} = \lambda \Sigma R_i. \quad (8)$$

После подстановки α и δ в формулу (6) форма критерия Фурье становится следующей:

$$F_0 = \frac{T}{\lambda c \gamma (\Sigma R_i)^2}. \quad (9)$$

В то же время относительная избыточная температура θ_0 на внутренней поверхности конструкции на момент ее остывания до температуры $t_{\text{ст}} = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ при времени T :

$$\theta_{\text{ст}} = \frac{(t_{\text{ст}} - t_{\text{int}})}{(t_{\text{int}} - t_{\text{ext}})}, \quad (10)$$

где t_{int} — расчетная температура обводненного грунта, равная $+7 \text{ } ^\circ\text{C}$;

t_{ext} — расчетная температура наружного воздуха, принимаемая в расчетах переменной, — от -10 до $-25 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Выражая время промерзания в явном виде, после преобразования получаем итоговую формулу для построения номограммы:

$$T = ((\theta_0 - \theta_{\text{ст}}) / B)^2 \cdot \lambda c \gamma (\Sigma R_i)^2. \quad (11)$$

Формула (11) является инженерной интерпретацией классического решения задачи нестационарной теплопроводности для полубесконечного тела [12–14]. Единственным неопределенным параметром в формуле (11) является коэффициент B .

Найдем его с помощью экспериментов над численными моделями шахтных стволов с чугунной и железобетонной обделками.

Численные модели созданы в геотехническом программном комплексе Midas GTS NX. Объемные конечно-элементные модели включают в себя грунтовый массив, обделку из чугунных или железобетонных тюбингов (участок высотой 3 м) с заполнением ячеек пеностеклобетоном и монолитную пеностеклобетонную рубашку толщиной 300 мм .

Общий вид модели показан на рис. 2.

Расчетная температура обводненного грунта $t_{\text{int}} = +7 \text{ } ^\circ\text{C}$ задана инструментом Prescribed Temperature. Поток воздуха по внутренней

поверхности шахтного ствола с температурой t_{ext} от -10 до -25 °С задан инструментом Convection.

В численных моделях отражена фактическая конфигурация тюбингов для обделки наружным диаметром 6,0 м (типовая обделка шахтных стволов) для случая чугунных или железобетонных тюбингов. На рис. 3 показан общий вид групп конечных элементов, моделирующих тюбинги и рубашку.

Теплотехнические расчеты моделей запускались при установленной инструментом Convection температуре t_{ext} на период времени до 25 суток. Критерием промерзания являлось достижение температуры $t_{\text{ст}} = 0,1$ °С. На рис. 4 показаны изополя распределения температуры грунта на контакте с обделкой на 19-е сутки эксперимента с обделкой из чугунных тюбингов. Время промерзания T определено интерполяцией и составило 18,78 суток.

На основании последовательно выполняемых расчетов при разных значениях температуры удалось подобрать коэффициенты B в формуле (11) для случая обделки шахтных стволов из чугунных и железобетонных тюбингов.

Окончательные формулы для расчета времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных (12) или железобетонных (13) тюбингов с рубашкой из пеностеклобетона:

$$T = ((\theta_0 - \theta_{\text{ст}}) / 6,1)^2 \cdot c_{\text{ч}} \gamma_{\text{ч}} \lambda_{\text{ч}} (\Sigma R_i)^2, \quad (12)$$

$$T = ((\theta_0 - \theta_{\text{ст}}) / 0,9)^2 \cdot c_{\text{жб}} \gamma_{\text{жб}} \lambda_{\text{жб}} (\Sigma R_i)^2, \quad (13)$$

$$\theta_0 = 1 / \alpha_{\text{int}} / (\Sigma R_i + 1 / \alpha_{\text{int}} + 1 / \alpha_{\text{ext}}),$$

$$R_i = \delta_i / \lambda_i.$$

По этим формулам были составлены номограммы для определения времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных (рис. 5) или железобетонных (рис. 6) тюбингов, в зависимости от толщины рубашки из пеностеклобетона и температуры воздуха.

Верификация математических зависимостей

Как видно из номограмм, для полного промерзания комбинированных обделок с толщиной рубашки из пеностеклобетона 300 мм требуется от 15 до 19 дней непрерывного

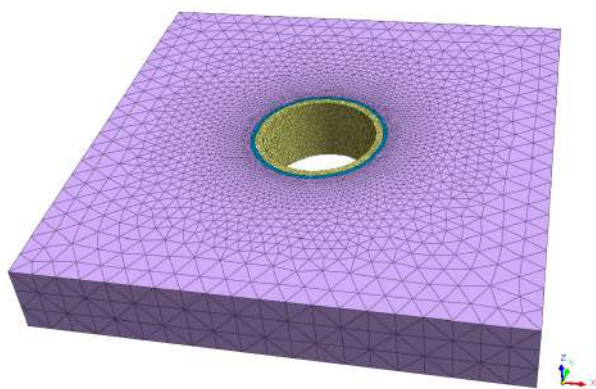


Рис. 2. Общий вид численной модели

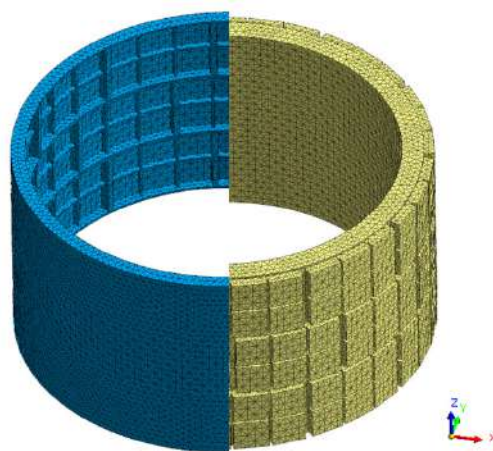


Рис. 3. Общий вид модели тюбингов и рубашки из пеностеклобетона

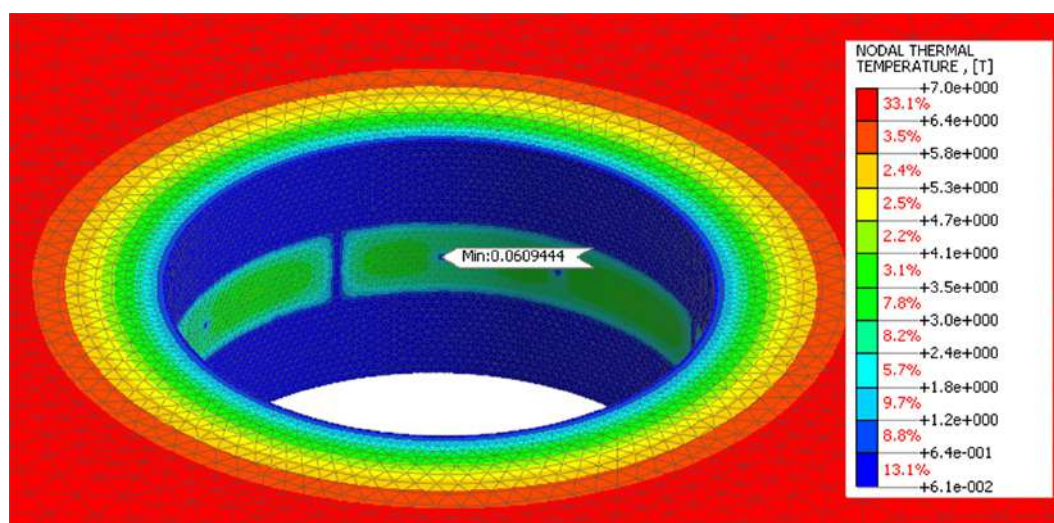


Рис. 4. Температура грунта на контакте с обделкой на 19-е сутки эксперимента с обделкой из чугунных тюбингов. Время промерзания $T = 18,78$ суток

заморозка с температурой $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является статистически маловероятным для условий Санкт-Петербурга.

Построенные математические зависимости подтверждаются экспериментом, выполненном в 2017 году на физической модели участка ствола с чугунной обделкой и рубашкой из

пеностеклобетона толщиной 300 мм. Если реализовать интерполяцию графика опускания температуры на контакте «обделка — грунт» (рис. 7), то полное промерзание ствола будет достигнуто примерно на 18–19-е сутки эксперимента, что соответствует номограмме, приведенной на рис. 5.

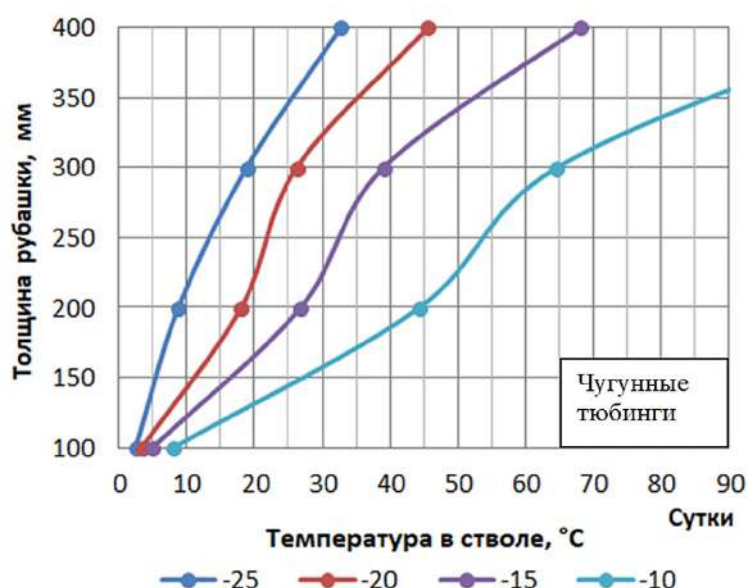


Рис. 5. Номограмма для определения времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных тюбингов

Также построенные математические зависимости подтверждаются результатами мониторинга реального объекта — вентиляционной шахты № 4 (ВШ-04), оснащенной системой мониторинга инженерных конструкций (СМИК). На рис. 8 показана диаграмма изменения темпе-

ратуры в стволе ВШ-04 за период с 03.12.2021 по 14.01.2022. Эта диаграмма была выбрана по причине относительно стабильной отрицательной температуры воздуха, составляющей в среднем -7°C . Из диаграммы видно, что за указанный период температура на контакте

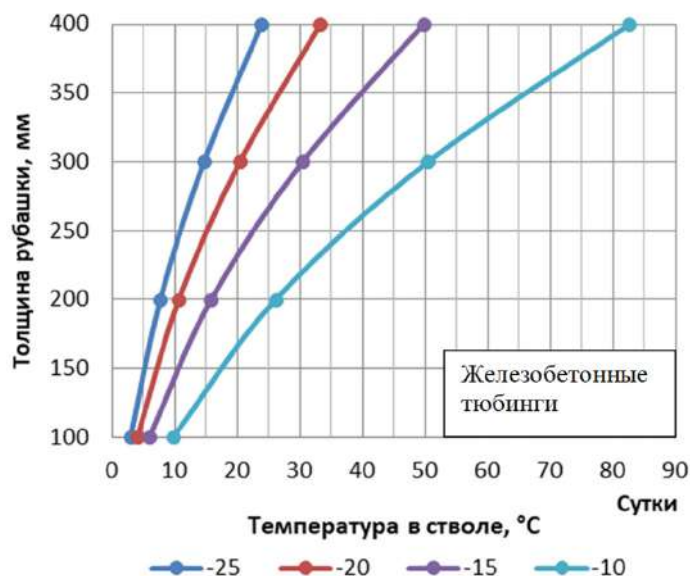


Рис. 6. Номограмма для определения времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из железобетонных тюбингов

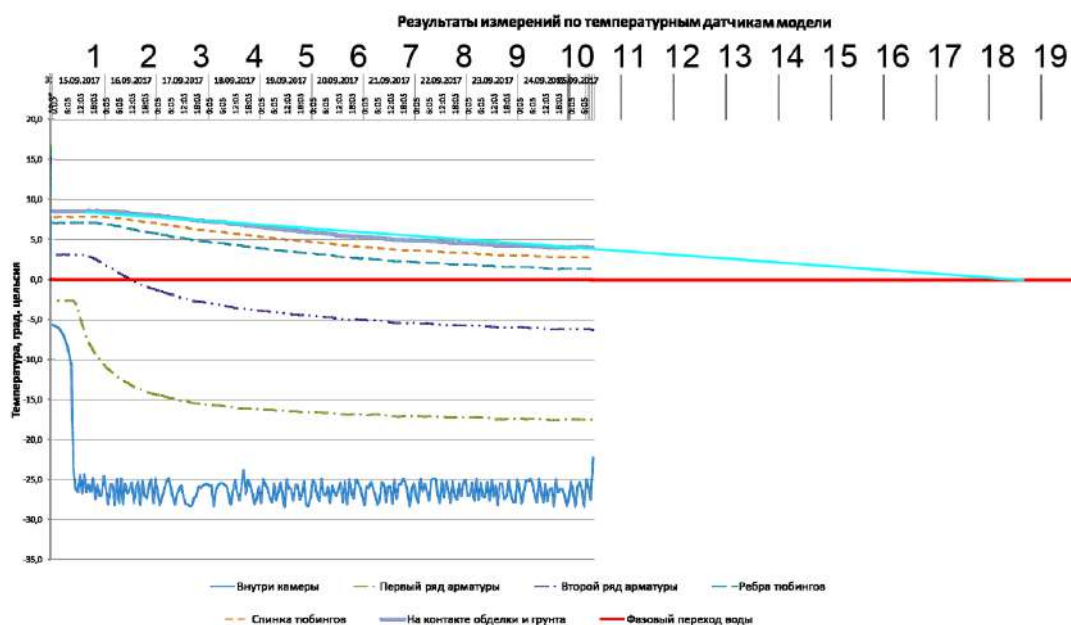


Рис. 7. Интерполяция графика опускания температуры на контакте «обделка — грунт» в физической модели 2017 года

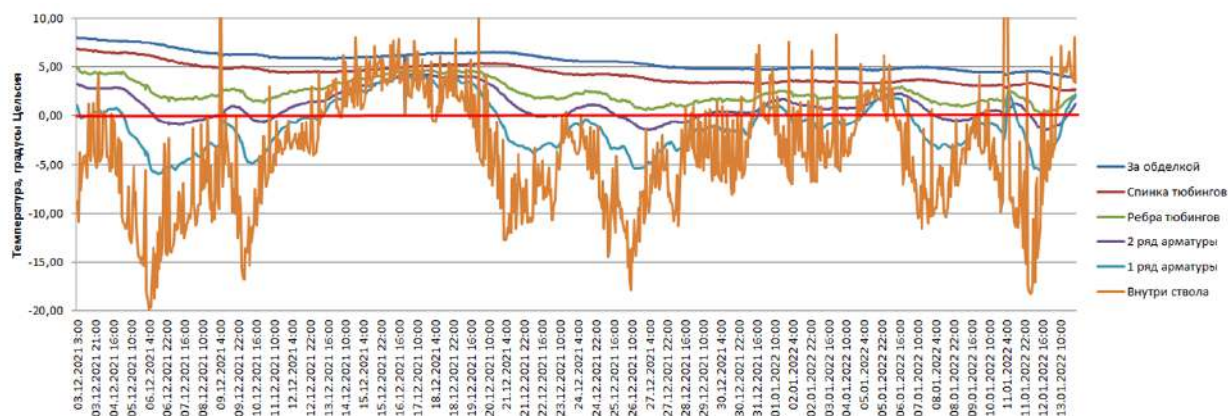


Рис. 8. Диаграмма изменения температуры в створе ВШ-04 за период с 03.12.2021 по 14.01.2022

«обделка — грунт» опустилась примерно на 2 °С. Таким образом, полное промерзание ствола было бы достигнуто примерно через три месяца стабильного похолодания с данной температурой, что соответствует расчету по формуле (12) (94,6 суток) и тем самым подтверждает ее предсказательную способность.

Заключение

Разработана и подтверждена математическая зависимость температуры на наружной поверхности обделки шахтного ствола от времени действия отрицательной температуры воздуха в шахте и тепловых характеристик конструкции. Практическим результатом применения такой зависимости является распространение данной технологии на другие регионы страны с учетом их климатических условий.

Список источников

1. Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена / А. А. Сокольников [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 2. С. 457–469.
2. Инструкция по устройству гидроизоляции сборных железобетонных и чугунных обделок тоннелей метрополитена закрытого способа работ / ЦНИИС, Метрогипротранс, Мосметрострой, Главтоннельметрострой (утверждена 25.12.1984). М., 1984. 77 с.

3. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. М.: Студент, 2012. 543 с.

4. Пианзин В. Я., Дианов В. М. Опыт восстановления гидроизоляции автодорожного тоннеля // Транспорт Российской Федерации. СПб., 2008. № 2 (15). С. 60–61.

5. Инструкция по безопасной эксплуатации оснований и строительных конструкций объектов инфраструктуры Петербургского метрополитена // ГУП «Петербургский метрополитен». СПб., 2020. 146 с.

6. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Свод правил по проектированию и строительству (дата введения: 21.08.2003) // ФГУП «КТБ ЖБ». М.: Госстрой России, 2004. 26 с.

7. ГОСТ Р 57208-2016. Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации: межгосударственный стандарт (дата введения: 02.11.2016) / АО «Кодекс». М.: Стандартинформ, 2017. 31 с.

8. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: межгосударственный стандарт (дата введения: 10.04.2024) // АО «Кодекс». М.: Стандартинформ, 2024. 69 с.

9. Ventilation Shafts Freezing Protection under the Influence of Negative Temperatures / E. G. Kozin [et al.] // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of Transsoilcold 2019. 2020. Pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53

10. Реновация вентиляционных стволов с устройством конструктивно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона / А. Н. Коньков [и др.] // Подземные горизонты. 2019. № 22. С. 56–58.

11. Бурин Д. Л., Новиков А. Л., Филонов Ю. А. Защита от промерзания вентиляционных стволов метрополитена с устройством конструкционно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона // Метро и тоннели. 2021. № 4. С. 21–23.

12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

13. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. М.: Наука, 1964. 488 с.

14. Кошмаров Ю. А., Башкирцев М. П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле: учебник. М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1987. 445 с.

Дата поступления: 16.06.2026

Решение о публикации: 11.07.2026

Контактная информация:

БАРАБАНИЩИКОВ Юрий Германович — доктор техн. наук, профессор; ugb@mail.ru

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — кандидат техн. наук, доцент; anlonkov@pgupstm.ru

НОВИКОВ Анатолий Леонидович — старший преподаватель; snoval@yandex.ru

ФИЛОНОВ Юрий Александрович — кандидат техн. наук, заведующий лабораторией; parad11@mail.ru

КОЗИН Евгений Германович — кандидат техн. наук, начальник ГУП «Петербургский метрополитен»; kegleev@gmail.ru

Mathematical Justification of the Mine Shaft Lining Freezing

Yu. G. Barabanshchikov¹, A. A. Sokornov², A. N. Konkov², A. L. Novikov², Yu. A. Filonov², E. G. Kozin³

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

³St. Petersburg Metro SUE, 28 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190013, Russia

For citation: Barabanshchikov Yu. G., Sokornov A. A., Konkov A. N., Novikov A. L., Filonov Yu. A., Kozin E. G. Mathematical Justification of the Mine Shaft Lining Freezing // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 789–800. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-789-800 (In Russian)

Abstract

A design has been developed for insulating the shaft with a foam-reinforced concrete jacket, which ensures that the soil does not freeze during the seasonal period of exposure to negative temperatures on the inner surface of the foam-reinforced concrete insulation. **The objective** of this article is to obtain a mathematical dependence of the temperature on the outer surface of the mine shaft lining on the duration of negative

air temperature in the mine and the thermal characteristics of the structure. **Methods:** analytical solutions to the problem of unsteady thermal conductivity for a semi-infinite body in combination with numerical solutions by the finite element method of a system that includes a ground massive, a mine shaft lining with a foam-glass jacket and a load from convection (cold air flow). **Results:** analytical formulas have been obtained for calculating the freezing time of mine shafts lined with cast iron or reinforced concrete tubings with a jacket made of foam glass concrete. Nomograms corresponding to these formulas have been constructed to determine the freezing time of mine shafts, depending on the foam-reinforced concrete jacket thickness and the air temperature. **Practical significance:** the results of the study make it possible to expand the scope of the technology of capital repairs of mines with a foam-reinforced concrete jacket to other regions of the country, taking into account their climatic characteristics.

Keywords: ventilation shafts, underground, ground massive, finite element method, foam glass concrete

References

1. Sokornov A. A., et al. Matematicheskoe modelirovanie termodinamicheskikh protsessov v ventilyatsionnykh shakhtakh metropolitena [Mathematical Modeling of Thermodynamic Processes in Ventilation Shafts of the Metro], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg Transport University]*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 457–469. (In Russian)
2. Instruktsiya po ustroystvu gidroizolyatsii sbornykh zhelezobetonnykh i chugunnykh obdelok tonneley metropolitena zakrytogo sposoba rabot [Instruction on the Installation of Waterproofing for Prefabricated Reinforced Concrete and Cast-Iron Linings of Metro Tunnels Constructed by the Closed Method], approved on December 25, 1984, Moscow, TsNIIS [Central Research Institute of Transport Construction], Metrogiprottrans [Metrogiprottrans Institute], Mosmetrostroy [Moscow Metro Construction], Glavtonnelmetrostroy [Main Directorate for Tunnel and Metro Construction], 1984, 77 p. (In Russian)
3. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mekhanika podzemnykh sooruzheniy i konstruktsiy krepey [Mechanics of Underground Structures and Support Systems], Moscow, Student, 2012, 543 p. (In Russian)
4. Piyanzin V. Ya., Dianov V. M. Opyt vosstanovleniya gidroizolyatsii avtodorozhnogo tonnelya [Experience in Restoring Waterproofing of a Highway Tunnel], *Transport Rossijskoj Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, St. Petersburg, 2008, no. 2 (15), pp. 60–61. (In Russian)
5. Instruktsiya po bezopasnoy ekspluatatsii osnovaniy i stroitelnykh konstruktsiy obyektov infrastruktury Peterburgskogo metropolitena [Instruction on the Safe Operation of Foundations and Building Structures of Infrastructure Facilities of the Petersburg Metro], St. Petersburg, GUP “Peterburgskiy metropoliten” [State Unitary Enterprise “Petersburg Metro”], 2020, 146 p. (In Russian)
6. SP 13-102-2003. Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitelnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu [Rules for the Inspection of Load-Bearing Building Structures of Buildings and Facilities. Set of Rules for Design and Construction]. Effective from August 21, 2003. Moscow, FGUP “KTB ZhB” [Federal State Unitary Enterprise “Scientific and Technical Bureau for Reinforced Concrete”], Gosstroy Rossii [State Committee for Construction of the Russian Federation], 2004, 26 p. (In Russian)
7. GOST R 57208-2016. Tonneli i metropoliteny. Pravila obsledovaniya i ustraneniya defektov i povrezhdeniy pri ekspluatatsii: mezhgosudarstvennyy standart [Tunnels and Metros. Rules for Inspection and Elimination of Defects and Damages during Operation: Interstate Standard]. Effective from November 2, 2016. Moscow, AO “Kodeks” [JSC Kodeks], Standartinform, 2017, 31 p. (In Russian)
8. GOST 31937-2024. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya: mezhgosudarstvennyy standart [Buildings and Structures. Rules for Inspection and Monitoring

of Technical Condition: Interstate Standard]. Effective from April 10, 2024. Moscow, AO “Kodeks” [JSC “Kodeks”], Standartinform, 2024, 69 p. (In Russian)

9. Kozin E. G., et al. Ventilation Shafts Freezing Protection under the Influence of Negative Temperatures, *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of Transoilcold 2019*. 2020, pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53.

10. Kon'kov A. N., et al. Renovatsiya ventilyatsionnykh stvolov s ustroystvom konstruktivno-teploizolyatsionnoy rubashki iz penosteklobetona [Renovation of Ventilation Shafts with the Installation of a Structural and Thermal Insulation Jacket Made of Foam Glass Concrete], *Podzemnye gorizonty [Underground Horizons]*, 2019, no. 22, pp. 56–58. (In Russian)

11. Burin D. L., Novikov A. L., Filonov Yu. A. Zashchita ot promerzaniya ventilyatsionnykh stvolov metropolitena s ustroystvom konstruktivno-teploizolyatsionnoy rubashki iz penosteklobetona [Protection against Freezing of Metro Ventilation Shafts with the Installation of a Structural and Thermal Insulation Jacket Made of Foam Glass Concrete], *Metro i tonneli [Metro and Tunnels]*, 2021, no. 4, pp. 21–23. (In Russian)

12. Lykov A. V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of Thermal Conductivity], Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1967, 600 p. (In Russian)

13. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Teploprovodnost' tverdykh tel [Conduction of Heat in Solids] (translated from English), Moscow, Nauka, 1964, 488 p. (In Russian)

14. Koshmarov Yu. A., Bashkirtsev M. P. Termodinamika i teploperedacha v pozharom dele: uchebnik [Thermodynamics and Heat Transfer in Fire Engineering: A Textbook], Moscow, Vysshaya inzhenernaya pozharno-tekhnicheskaya shkola MVD SSSR [Higher Engineering Fire-Technical School of the USSR Ministry of Internal Affairs], 1987, 445 p. (In Russian)

Received: June 16, 2026

Accepted: July 11, 2026

Author's information:

Yuriy G. BARABANSHCHIKOV — PhD in Engineering, Professor, ugb@mail.ru

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

Alexander N. KON'KOV — PhD in Engineering, Associate Professor; anlonkov@pgupstm.ru

Anatoly L. NOVIKOV — Senior Lecturer; snoval@yandex.ru

Yuriy A. FILONOV — PhD in Engineering, Head of the Laboratory; parad11@mail.ru

Evgenij G. KOZIN — PhD in Engineering, Head of the St. Petersburg Metro SUE; kegleev@gmail.ru

УДК 691.32

Влияние погрешности оценки качества бетона на надежность зданий и сооружений и эффективность использования потенциала бетона

Д. А. Черепанова

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

Для цитирования: Черепанова Д. А. Влияние погрешности оценки качества бетона на надежность зданий и сооружений и эффективность использования потенциала бетона // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 801–815. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-801-815

Аннотация

Цель: оценить достоверность результатов контроля качества бетона и установить его влияние на надежность зданий и сооружений, определить возможность более эффективного использования потенциала бетона в конструкции. **Методы:** сравнительное исследование существующих данных, норм и научных публикаций; синтез полученных данных для установления взаимосвязи между факторами системы контроля и отказом конструкций из бетона/железобетона; экспериментально-теоретические исследования автора, подтверждающие эффективность предложенных решений. **Результаты:** установлено, что неэффективно создавать материал с глобально улучшенными свойствами, если погрешность их оценки слишком велика. Требуется соразмерное развитие системы контроля, иначе закладываемый на разных этапах запас может полностью нивелироваться погрешностью контроля. Показаны основные элементы системы контроля, являющиеся источниками неучитываемых погрешностей в рамках контроля и оценки прочности бетона. Обоснована необходимость организации контроля в системе «структура — свойства — качество — надежность» вместо локальных улучшений в системах «структура — свойства», «свойства — качество», «прочность — надежность». Разработана кривая качества, наглядно отражающая стратификацию качества на разных этапах структурообразования бетона в течение производства и эксплуатации зданий и сооружений, включая обуславливающие ее факторы, а также погрешности в системе контроля и факторы, их обуславливающие. Предложена параллельная оценка прочности по модулю упругости, включая новый запатентованный метод. **Практическая значимость:** разработана графическая модель эффективной системы контроля качества, включающая перечень конкретных мероприятий, которые позволяют снизить локальные погрешности контроля и обеспечить наследственность показателей качества бетона на протяжении всего жизненного цикла зданий и сооружений. Это в конечном итоге позволит повысить эффективность использования потенциала бетона и обеспечить надежность зданий и сооружений на требуемом, заложенном при проектировании уровне. Оценен экономический эффект от повышения достоверности контроля прочности бетона.

Ключевые слова: система, контроль качества, бетон, прочность при сжатии, погрешность, надежность, модуль упругости, коэффициент запаса

Введение

На сегодняшний день номенклатура видов бетона достаточно широка и постоянно расширяется, удовлетворяя меняющиеся потребности строительной отрасли. При этом принципы контроля, заложенные в 1950-х годах, не претерпели существенных изменений, если не считать переход от характеристики «марка» к понятию «класс», призванный учитывать вариативность прочности бетона. Случающиеся отказы и аварии на строительных объектах, статистические данные об их причинах (основная — нарушение требований НД и отступление от проектов при выполнении строительно-монтажных работ — 36 %) [1], также подтверждают необходимость повышения качества контроля.

Контроль качества бетона в процессе строительства можно разделить на три иерархических уровня [2], на каждом из которых он на данный момент является слабым звеном, так как на сегодняшний день отстает от развития строительного материаловедения. Создание материала с требуемыми свойствами, качеством может быть неэффективно, если их невозможно однозначно оценить. Материал должен создаваться в системе **«структура — свойства — качество — надежность»**, а не «структура — свойства», «свойство — качество» и «прочность — надежность» [3–8], как происходит на данный момент, из-за чего не обеспечивается безотказность конструкций из бетона/железобетона и, соответственно, требуемый уровень надежности зданий и сооружений в целом. Кроме того, низкая достоверность результатов в рамках действующей системы контроля занижает потенциал использования бетонов, особенно высокопрочных, что обуславливает актуальность заявленной темы исследования.

Рабочая гипотеза была направлена на разработку, совершенствование и эффективную организацию элементов системы контроля качества бетона с учетом того, что проблема обеспечения качества, эффективности и надежности материала не может быть решена исключительно с точки зрения его структуры и технологии производства, а также строительства. Предполагается, что для этого необходимо учитывать ключевые риски в системе контроля, связанные с неоднородностью прочности бетона в конструктивных элементах [9, 10], а также с недостаточным уровнем достоверности и информативности результатов контроля [8, 11–13]. Такой подход позволит снизить погрешности в оценке качества на всех этапах жизненного цикла строительства и на всех уровнях контроля [2], **интегрируя контроль в систему «структура — свойства — качество — надежность»**. Это обеспечит эффективность использования бетона и достижение требуемого уровня надежности зданий и сооружений, определенного на этапе проектирования.

Методы

Произведено сравнительное исследование существующих данных, норм и научных публикаций в части контроля качества бетона, осуществлен синтез полученных данных для установления взаимосвязи между факторами системы контроля, уровнем качества бетона на разных этапах жизненного цикла зданий и сооружений и отказом конструкций из бетона/железобетона. Проведены экспериментально-теоретические исследования автора, подтверждающие эффективность предложенных решений по снижению суммарной погрешности контроля.

Результаты

Если говорить о качестве бетона, то к какой бы из множества его трактовок, используемых в разных сферах, мы ни обращались, однозначно одно: качество меняется в процессе жизненного цикла зданий и сооружений, а от возможности его достоверной оценки на любом из этапов напрямую зависит надежность.

Исходя из этого, система контроля качества является ключевым инструментом и основополагающим элементом, обеспечивающим поддержание требуемого уровня прочности на всех этапах жизненного цикла бетонных конструкций. Важнейшим аспектом является способность проводить оценку качества с одинаковой степенью достоверности на протяжении всего срока службы зданий и сооружений [14, 15]. Без этого невозможно говорить об эффективности системы контроля.

Можно создать бетон с глобально улучшенными свойствами, качеством, но если погрешность их оценки слишком велика, то его эффективное использование станет невозможным.

На рис. 1 представлена кривая качества бетона. Она отражает изменение качества на ключевых этапах структурообразования: в процессе производства и эксплуатации зданий и сооружений.

Кривая показывает:

- граничные области качества;
- погрешность определения качества на каждом этапе — она связана с несовершенством действующей системы контроля;
- уровень проектного качества, то есть параметры, которые закладываются еще до физического создания бетона;
- факторы, негативно влияющие на качество, — их постепенное накопление приводит

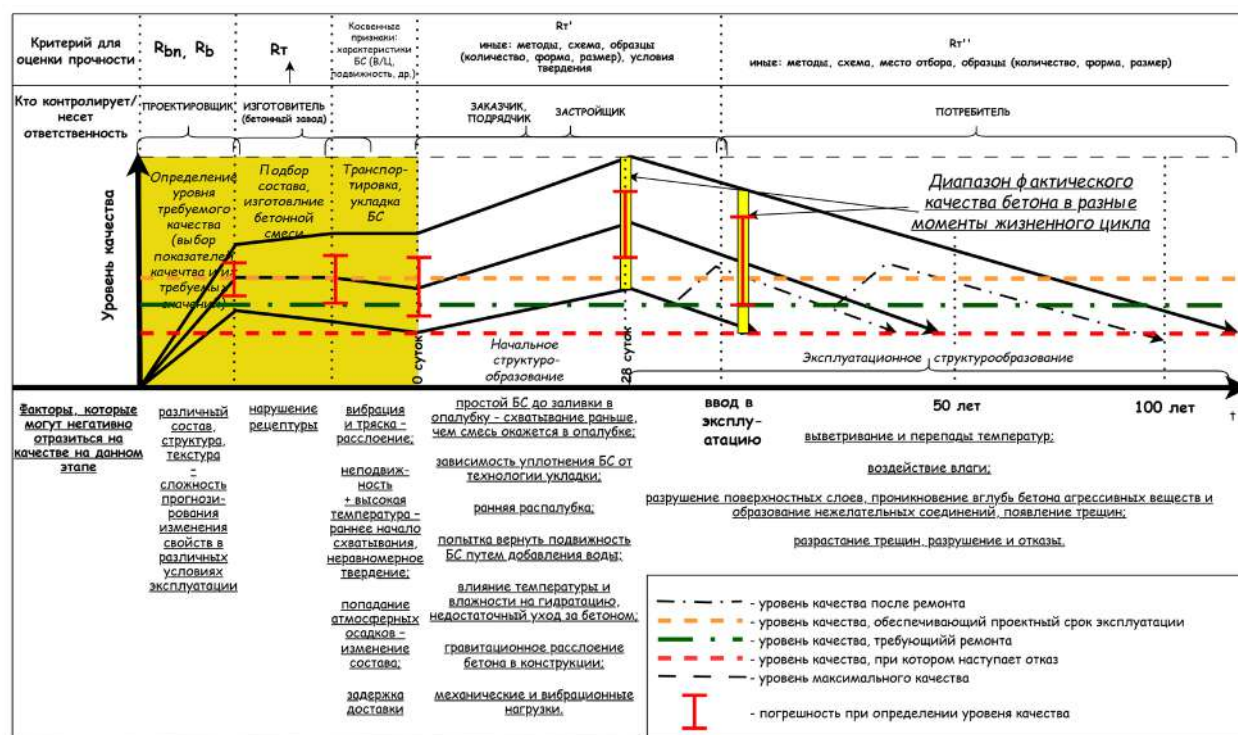


Рис. 1. Кривая качества бетона на разных этапах структурообразования бетона в течение производства и эксплуатации зданий и сооружений

к снижению нижней границы качества относительно среднего уровня;

- верхнюю границу качества — она постепенно расширяется вверх от среднего уровня за счет прибавки запаса характеристик на каждом этапе.

Механизм запаса прочности будет рассмотрен далее.

Основная проблема существующей системы контроля — недостаточная достоверность оценки качества. Это касается как интегральной характеристики, так и отдельных показателей. Из-за этого некорректно оцениваются и прогнозируются показатели надежности, в частности прочность.

Следствием такой ситуации становится несвоевременное проведение планово-предупредительного ремонта и других мероприятий по обслуживанию зданий и сооружений.

В результате даже при наличии запаса по различным показателям качества (который порой кажется избыточным) не всегда удастся обеспечить безотказность и надежность бетонных и железобетонных конструкций, зданий и сооружений, а также эффективное использование потенциала бетонов, особенно высокопрочных.

Причем существующий в настоящее время подход к запасу прочности закрывает только материаловедческие причины и по большей части только с точки зрения материала в идеальных условиях (изменчивость бетона в конструкции по-прежнему изучена мало).

Что же приводит к стратификации кривой качества (рис. 1)? Если говорить о контроле прочности, наследственность этого показателя не позволяют обеспечить такие факторы, как **объем выборки, различие показателей качества, форм образцов, мест, методов контроля, направлений испытания на разных эта-**

пах, схем оценки прочности, неучитываемые погрешности средств измерения и методики расчета прочности. Последнее при наихудшем сочетании обстоятельств дает суммарную неконтролируемую погрешность, приводящую к ситуации, когда соответствующий заявленным характеристикам по результатам контроля бетон по факту не соответствует требованиям, что может привести к отказу конструкции. Бывают ситуации, когда бетон требуемого качества признается несоответствующим требованиям и отбраковывается, что, кроме дополнительных финансовых затрат, порождает конфликт интересов в системе «поставщик бетона — застройщик — подрядчик — потребитель».

Если использовать теорию вероятности для обоснования эффективности предложенного решения увязывания системы контроля в систему «структура — свойство — качество — надежность», то ошибки контроля **в разрозненных системах** «структура — свойство», «свойства — качество» и «прочность — надежность» **суммируются** как независимые события, **а в единой системе** (когда они станут зависимыми) **будут перемножаться**, что позитивно отразится на достоверности итогового результата контроля и позволит уменьшить размах суммарной накапливающейся погрешности (рис. 1).

Увязать все этапы контроля предложено путем совокупного воздействия по четырем направлениям, в рамках которых находятся источники ошибок в системе контроля, приводящие к потере наследственности при переходе от этапа к этапу и влияющие на достоверность результата контроля: **структурообразование, метрология, квалиметрия, статистика.**

Погрешность в результат вносит и теоретическая база. Если говорить о теоретических основах определения класса бетона, то с учетом действующих правил для высокопрочного бетона определение соседних классов по

прочности затруднено по нормативам РФ из-за недостаточных требований к показателям однородности и стабильности качества. Показатели контролируемой прочности бетона соответствующего класса определяются по средней величине, а разброс значений в пределах класса может быть достаточно значительным [16]. Это свидетельствует о том, что использование высокопрочных бетонов требует пересмотра принципов оценки качества и более высоких требований к однородности прочности бетона.

Согласно данным, представленным в нормативах ЕС [17], различие форм образцов, используемых для испытания на разных этапах, ухудшает сходимость/воспроизводимость результата на 0,3–1,6 %.

Разный размер образцов также существенно влияет на результат. Например, цилиндры с соотношением высоты 1:1 и 1:2 по-разному отражают работу бетона в конструкции.

Кроме того, определение прочности как прямого, а не косвенного измерения в сочетании с недостаточной точностью при определении геометрических размеров добавляет 4–5 % неучитываемой погрешности [18].

Надежность зданий и сооружений — это их способность выполнять требуемые функции в течение расчетного периода эксплуатации [19]. Она охватывает безопасность, эксплуатационную пригодность и долговечность конструкции [20] и чаще всего оценивается вероятностью отказа и связанным с ней индексом надежности [21]. Эти показатели зависят от предполагаемых и обобщенных величин нагрузочного эффекта и сопротивления элементов, распределение которых считается соответствующим распределению Гаусса (нормальному распределению): вероятность, что резерв прочности будет больше 0. Связь коэффициента запаса и вероятности отказа и индекса надежности исследовалась ранее и отражена в [22].

Запас прочности бетона (для высокопрочных бетонов с учетом подхода даже избыточный, но не гарантирующий безотказность) на разных этапах формируется:

- при учете коэффициента вариации прочности с учетом требуемого уровня обеспеченности 0,95;
- при введении коэффициента надежности (1,3 для тяжелого бетона), затем при определении фактического класса бетона.

Суммарный коэффициент запаса ($K_{\text{зап}}$) (теоретический) составляет в среднем 2,23 (отношение требуемой по результатам испытания средней прочности к расчетному сопротивлению по первой группе предельных состояний).

Связь требуемой по результатам испытания прочности с расчетным и нормативным сопротивлением и их численные значения для классов бетона по прочности В30 и В100 представлены в табл. 1.

Перечисленные ранее неконтролируемые / не учитываемые погрешности в системе контроля прочности бетона приводят к такой суммарной погрешности ее оценки на любом из этапов (разности между истинным значением прочности и определенным в рамках контроля), которая съедает запас прочности полностью или в значительной степени. При этом в случае, если фактический коэффициент запаса снижается на 10 %, вероятность отказа конструкции увеличивается сразу в 1,64 раза (табл. 2).

Согласно Еврокодам [21], расчет запаса прочности осуществляется на основании вероятности отказа, равной 10^{-4} , она взята за опорную точку для представленных расчетов.

Одно из ключевых предлагаемых обновлений в системе контроля, за счет которого удастся перейти к системе «структура — свойства — качество — надежность», — это проектирование контроля под каждый объект строительства индивидуально по уровню надежности

ТАБЛИЦА 1. Связь требуемой по результатам испытания прочности с расчетным и нормативным сопротивлением

Показатель	Нормативное сопротивление, R_{bn} , МПа	Расчетное сопротивление, R_b , МПа	Требуемая прочность, R_t , МПа
Расчет	$R_{bn} = R_{пр} = \frac{B}{(1-tV)}$	$R_b = \frac{R_{bn}}{\gamma_b}$	$R_t = R_{ср} = B \cdot K_t$
Примечание	$R_{пр}$ — средняя прочность образцов-призм 1 : 4; t — коэффициент Стьюдента — 1,64; V — коэффициент вариации прочности, принят равным 13 % (0,13)	$\gamma_b = 1,3$ — коэффициент надежности по бетону; для высокопрочных R_b дополнительно умножается на понижающий коэффициент	K_t — от 1,07 до 1,43; для высокопрочных — не меньше 1,14; при $V = 13\%$ — 1,28; по схеме Г — $R_t = \frac{B}{0,8}$
Для В30	22,0	17,0	38,4
Для В100	71,0	47,5	128,0

ТАБЛИЦА 2. Изменение уровня надежности при снижении коэффициента запаса

ν_R	ν_Q	$K_{зап}$	β	P_f	Увеличение P_f , %
0,13	0,47	2,23	2,419	0,00734	—
		2,19	2,343	0,00895	18
		2,17	2,305	0,00986	26
		2,13	2,229	0,01191	38
		2,09	2,153	0,01431	49
		2,05	2,077	0,01707	57
		2,01	2,001	0,02022	64

в сочетании с расширенным контролем прочности по модулю упругости, который позволит исключить/сократить большинство составляющих причин всех видов погрешностей.

Во время проектирования возможно определить наиболее опасные участки и для контроля именно в них (в любой момент жизненного цикла) использовать новый запатентованный метод неразрушающего контроля [24], а также учитывать недостатки/ограничения других методов, закрепить их в информационной модели,

предусмотреть необходимые поправочные коэффициенты по условиям твердения, направление изготовления/выбурирования образцов с учетом выбранного метода и иные требуемые для контроля повышенной точности мероприятия.

Переход на образцы-цилиндры с соотношением сторон 1:2 (вместо 1:1) даст следующие преимущества:

- модуль упругости можно будет определять с достаточной точностью до проведения разрушающего контроля;

- на основе этих данных можно будет строить более точные градуировочные кривые для других неразрушающих методов;

- появится возможность установить зависимость между работой бетона в сочетании с другими материалами (например, арматурой) и результатами различных разрушающих и неразрушающих методов контроля.

Еще одно ключевое обновление системы контроля, которое позволит перейти к концепции «структура — свойства — качество — надежность», заключается в проектировании системы контроля индивидуально для каждого объекта строительства с учетом требуемого уровня надежности, а также в расширенном контроле прочности по модулю упругости, который поможет сократить или исключить большинство причин возникновения погрешностей.

На этапе проектирования можно выявить наиболее опасные участки. Для их контроля на любом этапе жизненного цикла предлагается:

- применять новый запатентованный метод неразрушающего контроля [23];

- учитывать ограничения других методов и фиксировать их в информационной модели;

- предусматривать поправочные коэффициенты с учетом условий твердения;

- выбирать направление изготовления или выбуривания образцов в соответствии с выбранным методом контроля;

- реализовывать иные мероприятия, необходимые для обеспечения повышенной точности контроля.

На рис. 2 представлена модель усовершенствованной системы контроля качества бетона, которая включает в себя перечисленные выше мероприятия и дополнительные меры, позволяющие сократить локальные погрешности на разных этапах и при использовании разных методов контроля.

В результате сочетания этих мер вероятность отказа снизится до требуемого уровня,

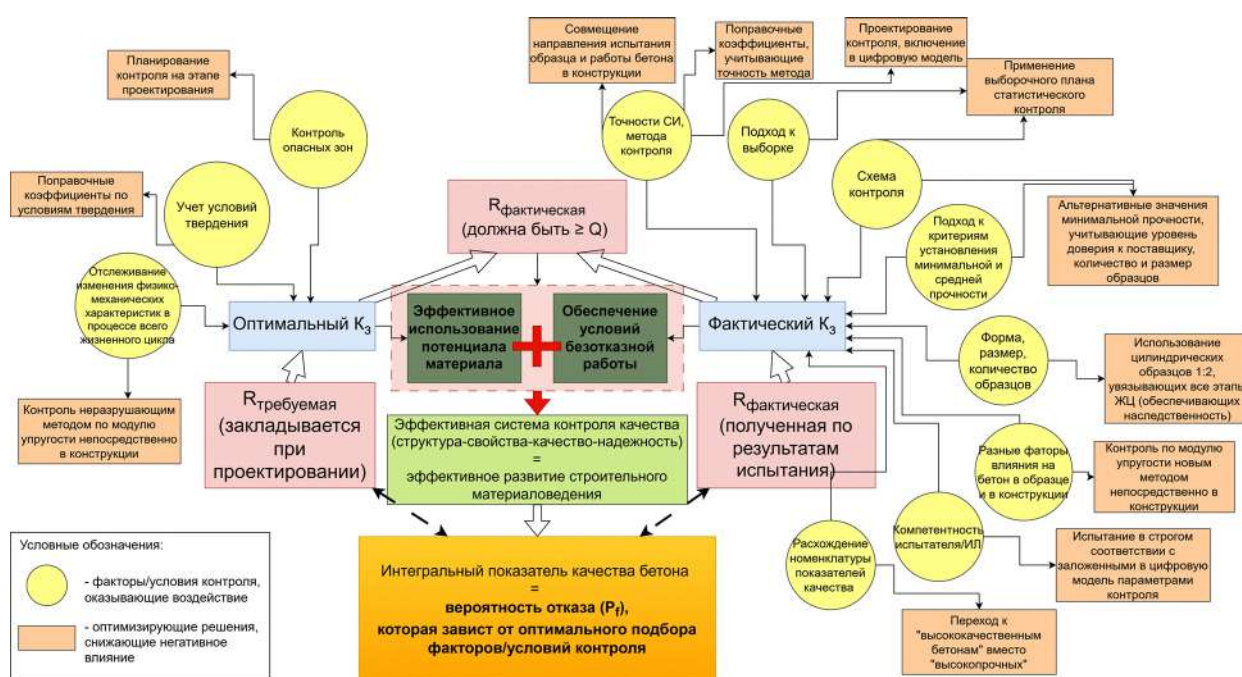


Рис. 2. Схема модели оптимальной системы контроля качества бетона, ориентированной на достижение требуемого уровня надежности и эффективное использование потенциала бетона

заложенного при проектировании. Сейчас при неблагоприятном стечении обстоятельств вероятность отказа составляет 100%. Эффективность системы контроля определяется близостью оптимального (закладываемого при проектировании), контрольного и реального коэффициентов. Чем ближе эти значения, тем эффективнее система контроля.

Экономический эффект от внедрения описанной модели достигается за счет снижения затрат на бетон разных классов. Это становится возможным благодаря использованию бетона более низкого класса по прочности при сохранении требуемых характеристик за счет повышения достоверности контроля.

Снижение класса бетона оценивалось путем расчета требуемой прочности при повышении достоверности контроля на 10, 20 и 30 % (рис. 3, 4, табл. 3).

В результате при повышении достоверности на 10 % выигрыш составляет в среднем один класс прочности, на 20 % — два класса, на 30 % — три класса.

Кроме того, экономический эффект будет достигаться за счет своевременности проведения ремонтных работ в течение предусмотренного срока эксплуатации (переноса их на более поздний или ранний срок) с сохранением требуемого уровня надежности.

Выводы

Действующая система контроля создает условия, при которых возводимые/эксплуатируемые здания и сооружения имеют вероятность непредсказуемого отказа в любой из моментов их жизненного цикла. В связи с этим требуется изменение модели контроля для достижения требуемого уровня надежности. Поэтому необходимо проектировать систему контроля индивидуально под каждый объект строительства, используя предложенные инструменты для повышения достоверности результатов контроля, в том числе параллельный контроль по модулю упругости, который позволит обеспечить наследственность показателей качества бетона, увязав контроль в единую систему

Класс, В	$R_{тр}$ по схеме Г (В/0,8), МПа	$R_{тр} \cdot 0,9$, МПа	$R_{тр} \cdot 0,8$, МПа	$R_{тр} \cdot 0,7$, МПа
12,5	15,6	—	—	—
15	18,8	—	—	—
20	25,0	22,5	20,0	17,5
22,5	28,1	—	—	—
25	31,3	—	—	—
30	37,5	33,8	30,0	26,3
35	43,8	—	—	—
40	50,0	45,0	40,0	35,0
45	56,3	—	—	—
50	62,5	56,3	50,0	43,8
55	68,8	—	—	—
60	75,0	67,5	60,0	52,5
70	87,5	—	—	—
80	100,0	90,0	80,0	70,0
90	112,5	—	—	—
100	125,0	112,5	100,0	87,5

Рис. 3. Требуемая средняя прочность для соответствующего класса ($R_{тр}$) (по результатам испытания по схеме Г)

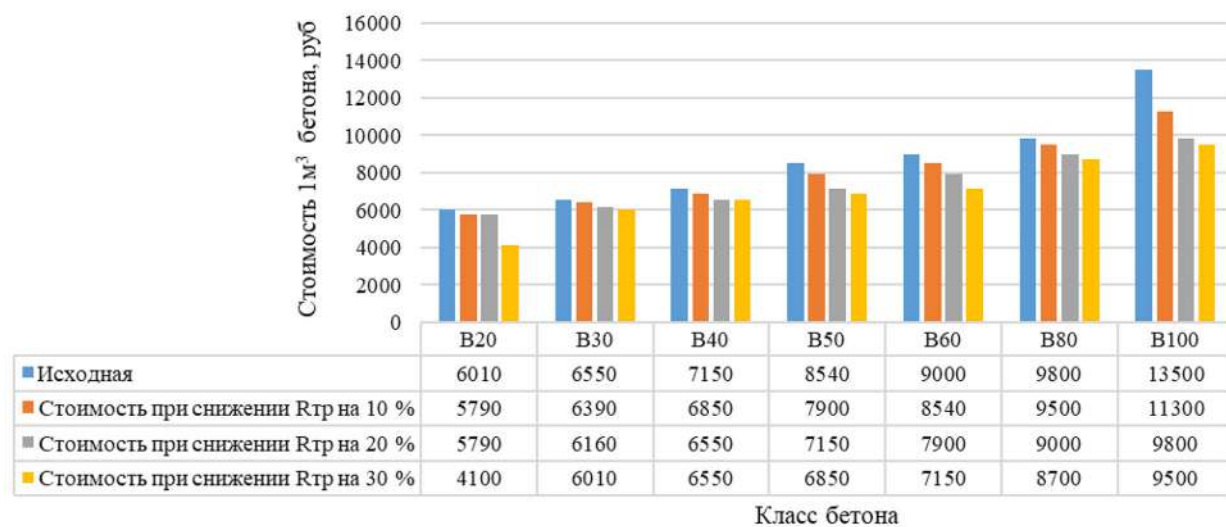


Рис. 4. Снижение затрат при повышении достоверности контроля

Примечание: среднее значение стоимости рассчитано на основе открытых данных о стоимости, представленных бетонными заводами в сети Интернет, для бетона разной подвижности и морозостойкости по состоянию на май 2026 года

ТАБЛИЦА 3. Определение экономического эффекта (по классам бетонов) за счет повышения достоверности на 10, 20 и 30 %

Класс бетона	Средняя стоимость 1 м³ бетона данного класса, руб.	При снижении требуемой средней прочности, полученной по результатам испытания (повышении достоверности контроля):					
		на 10 %		на 20 %		на 30 %	
		снижение класса	снижение стоимости, %	снижение класса	снижение стоимости, %	снижение класса	снижение стоимости, %
B20	6010	до 15	6,2	до 15	3,7	до 12,5	31,8
B30	6550	до 25	2,5	до 22,5	6,0	до 20	8,2
B40	7150	до 35	4,2	до 30	8,4	до 30	8,4
B50	8540	до 45	7,5	до 40	16,3	до 35	19,8
B60	9000	до 50	5,1	до 45	12,2	до 40	20,6
B80	9800	до 70	3,1	до 60	8,2	до 55	11,2
B100	13 500	до 90	19,5	до 80	27,4	до 70	29,6
В среднем		на 1 класс	6,9	на 2 класса	11,7	на 3 класса	18,5

«структура — свойства — качество — надежность». Экономический эффект от внедрения будет достигаться за счет своевременности проведения ремонтных работ в течение предусмотренного срока эксплуатации (переноса их на более поздний или ранний срок), а также возможности использования бетона более низкого класса по прочности с сохранением требуемого уровня надежности.

Список источников

1. Статистика по авариям/обрушениям // Нострой. URL: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (дата обращения: 05.06.2026).
2. Черепанова Д. А. Наследственность показателей качества бетона как фактор эффективного контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, вып. 4. С. 1060–1072. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1060-1072. EDN GDKOUR
3. Степанова И. В., Абу-Хасан М. С., Соловьева В. Я. Инновационный конструкционно-теплоизоляционный бетон для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов основания // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, вып. 2. С. 378–389. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-378-389. EDN HFJXHC
4. Казанская Л. Ф., Майер В. А., Сибгатуллин Э. С. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 4. С. 931–943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943. EDN GXVSEW
5. Daanoun N., Kernou N. Impact of Concrete Compressive Strength on the Reliability and the Plastic Moment Of Steel-Concrete Composite Beams // Military Technical Courier. 2025. Vol. 73, no. 1. Pp. 162–182. DOI: 10.5937/vojtechg73-53935. EDN WGNALZ
6. Беленцов Ю. А., Казанская Л. Ф. Прочностные характеристики бетона и надежность строительных конструкций: учебное пособие. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2025. 61 с. EDN TYZZIB
7. Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона на надежность сжатых железобетонных конструкций / В. М. Попов [и др.] // Жилищное строительство. 2025. № 1–2. С. 91–95. DOI: 10.31659/0044-4472-2025-1-2-91-95. EDN WMZVTD
8. Беленцов Ю. А., Казанская Л. Ф. Теория информации при выборе параметров качества строительных материалов // Значение трудов Д. И. Менделеева в современных инновационных решениях: сборник трудов X Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 12–13 сентября 2024 года). М.: Спутник+, 2024. С. 40–46. EDN TOLSVC
9. Байбурун А. Х., Погорелов С. Н. Исследование неоднородности прочности бетона монолитных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 3 (29). С. 12–18. DOI: 10.5862/MCE.29.1. EDN NQPAHQ
10. Беленцов Ю. А., Казанская Л. Ф., Докшина Е. А. Роль однородности материала в точности определения прочностных характеристик высокопрочных бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, вып. 2. С. 499–508. DOI 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508. EDN FEXMXG
11. Виноградова Е. В. Оценка качества бетона при обследовании конструкций // Строительство-2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства: материалы международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 18–19 декабря 2014 года). Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», 2014. С. 230–232. EDN UTXOWV
12. Виноградова Е. В., Григорьев К. А. Вопросы оценки качества современного бетона при обследовании конструкций // Развитие

строительного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства: сборник трудов международной научно-практической конференции (Москва, 30 июня 2025 года). М.: Спутник+, 2025. С. 51–57. EDN OGYPUV

13. Королев Е. В., Беленцов Ю. А. Применение теории информации в решении задач строительного материаловедения // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 3 (56). С. 13–28. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_13. EDN NDKOJM

14. Беленцов Ю. А., Черепанова Д. А. Влияние методики контроля качества бетона по физико-механическим показателям на надежность строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2023. № 5/6 (619). С. 25–31. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-25-31. EDN KNYLOR

15. Виноградова Е. В. Проблемы управления качеством бетонных работ // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3 (21). С. 711–714. EDN PJZXVB

16. Беленцов Ю. А., Черепанова Д. А. Переход на многоуровневую систему контроля прочности бетона в ответственных конструкциях // Строительство и архитектура. 2025. Т. 13, № 4 (49). DOI: 10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0011. EDN EXFMLN

17. EN 12390-3. Методы испытаний бетона. Часть 3. Определение прочности на сжатие испытываемых образцов (EN 12390-3:2009+AC:2011).

18. Метрологическое обеспечение контроля качества бетонов для обеспечения расчетного уровня надежности строительной продукции / Ю. А. Беленцов [и др.] // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 4 (1040). С. 34–36. EDN NQSJMF

19. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.

20. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.

21. EN 1990. Основы проектирования конструкций.

22. Черепанова Д. А. Обеспечение требуемого уровня надежности при контроле качества бетонов // Актуальные проблемы современного строительства: материалы LXXVI Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 ч. (Санкт-Петербург, 17–20 октября 2023 года). СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. С. 447–453. EDN ADROUG

23. Способ контроля прочности бетона: патент № 2815345 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/08. № 2023130502 / Беленцов Ю. А., Черепанова Д. А.; заявитель: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»; заявл. 21.11.2023; опубл. 13.03.2024. EDN GPFCKR

Дата поступления: 10.06.2026

Решение о публикации: 03.07.2026

Контактная информация:

ЧЕРЕПАНОВА Дария Алексеевна — старший преподаватель кафедры «Строительные материалы и технологии», начальник отдела качества; cherepanova@pgups.ru

The Impact of Errors in Concrete Quality Assessment on the Reliability of Buildings and Structures and the Efficiency of Utilizing Concrete's Potential

D. A. Cherepanova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Cherepanova D. A. The Impact of Errors in Concrete Quality Assessment on the Reliability of Buildings and Structures and the Efficiency of Utilizing Concrete's Potential // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 801–815. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-801–815 (In Russian)

Abstract

Purpose: to evaluate reliability of concrete quality control results and establish its impact on reliability of buildings and structures, to determine possibility of more efficient use of concrete potential in a structure. **Methods:** comparative study of existing data, standards and scientific publications to establish relationship between control system factors and failure of concrete/reinforced concrete structures. Experimental and theoretical studies of the author confirming efficiency of the proposed solutions. **Results:** it was established that it is ineffective to create material with globally improved properties if the error in their estimation is too great – proportionate development of the control system is required, otherwise the reserve laid at different stages can be completely leveled out by the control error; the main elements of the control system that are sources of unaccounted errors in the framework of control and assessment of concrete strength are shown; the necessity of organizing control in the system “structure–properties–quality–reliability” instead of local improvements in the systems “structure–property”, “properties–quality”, “strength–reliability” is substantiated; a “quality curve” has been developed that clearly illustrates quality stratification at various stages of concrete structure formation during the construction and service life of buildings and structures, accounting for the underlying factors as well as errors in the control system and their causes; a parallel strength assessment based on the modulus of elasticity — including a new patented method — has been proposed. **Practical importance:** a graphical model of an effective quality control system has been developed, including a list of specific measures that reduce local control errors and ensure the consistency of concrete quality indicators throughout the entire life cycle of buildings and structures. This will ultimately improve the efficiency of concrete's potential and ensure the reliability of buildings and structures at the required level, as set out in the design. The economic effect of improving the reliability of concrete strength monitoring has been assessed.

Keywords: system, quality control, concrete, compressive strength, error, reliability, modulus of elasticity, safety factor

References

1. Statistika po avariya/obrusheniyam [Statistics on Accidents/Collapses], Nostroy. URL: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (accessed: June 05, 2026). (In Russian)
2. Cherepanova D. A. Nasledstvennost' pokazateley kachestva betona kak faktor effektivnogo kontrolya [Heredity of Concrete Quality Indicators as a Factor of Effective Control], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg State Transport University]*, 2025, vol. 22, no. 4, pp. 1060–1072. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-1060-1072. EDN GDKOUR (In Russian)
3. Stepanova I. V., Abu-Hasan M. S., Solovyova V. Ya. Innovatsionnyy konstruktsionno-teplo-izolyatsionnyy beton dlya izolyatsii i povysheniya

ustoychivosti merzlykh gruntov osnovaniya [Innovative Structural and Thermal Insulation Concrete for Insulation and Increasing the Stability of Frozen Foundation Soils], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg State Transport University], 2022, vol. 19, no. 2. pp. 378–389. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-378-389. EDN HFJXHC (In Russian)

4. Kazanskaya L. F., Mayer V. A., Sibgatullin E. S. Vzaimosvyaz' faktorov, opredelyayushchikh dolgovechnost' betonov [Interrelation of Factors Determining the Durability of Concrete], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg State Transport University], 2024, vol. 21, no. 4, pp. 931–943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943. EDN GXVSEW (In Russian)

5. Daanoun N., Kernou N. Impact of Concrete Compressive Strength on the Reliability and the Plastic Moment of Steel-Concrete Composite Beams, *Military Technical Courier*, 2025, vol. 73, no. 1, pp. 162–182. DOI: 10.5937/vojtehg73-53935, EDN WGNALZ

6. Belentsov Yu. A., Kazanskaya L. F. Prochnostnye kharakteristiki betona i nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsiy: uchebnoe posobie [Strength Characteristics of Concrete and Reliability of Building Structures: A Textbook], Saint Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I [Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I], 2025, 61 p. EDN TYZZIB (In Russian)

7. Popov V. M., et al. Vliyanie izmenchivosti deformatsionnykh kharakteristik betona na nadezhnost' szhatykh zhelezobetonnykh konstruktsiy [Influence of Variability of Deformation Characteristics of Concrete on the Reliability of Compressed Reinforced Concrete Structures], *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2025, no. 1–2, pp. 91–95. DOI: 10.31659/0044-4472-2025-1-2-91-95. EDN WMZVTD (In Russian)

8. Belentsov Yu. A., Kazanskaya L. F. Teoriya informatsii pri vybore parametrov kachestva stroitel'nykh

materialov [Information Theory in the Selection of Quality Parameters of Building Materials], *Znachenie trudov D. I. Mendeleeva v sovremennykh innovatsionnykh resheniyakh: sbornik trudov X mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The Significance of the Works of D. I. Mendeleev in Modern Innovative Solutions: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference], St. Petersburg, September 12–13, 2024, Moscow: Sputnik+, 2024, pp. 40–46. EDN TOLSVC (In Russian)

9. Bayburin A. Kh., Pogorelov S. N. Issledovanie neodnorodnosti prochnosti betona monolitnykh konstruktsiy [Study of the Inhomogeneity of Concrete Strength in Monolithic Structures], *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2012, no. 3 (29), pp. 12–18. DOI: 10.5862/MCE.29.1. EDN NQPAXQ (In Russian)

10. Belentsov Yu. A., Kazanskaya L. F., Dokshina E. A. Rol' odnorodnosti materiala v tochnosti opredeleniya prochnostnykh kharakteristik vysokoprochnykh betonov [The Role of Material Homogeneity in the Accuracy of Determining the Strength Characteristics of High-Strength Concrete], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg State Transport University], 2025, vol. 22, no. 2, pp. 499–508. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-499-508. EDN FEXMXG (In Russian)

11. Vinogradova E. V. Otsenka kachestva betona pri obsledovanii konstruktsiy [Assessment of Concrete Quality During Structural Inspection], *Stroitel'stvo 2014: sovremennye problemy promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Construction 2014: Modern Problems of Industrial and Civil Construction: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference], Rostov-on-Don, December 18–19, 2014, Rostov-on-Don: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Rostov State University of Civil Engineering [FGBOU VPO Rostovskiy gosudarstvennyy

stroitel'nyj universitet], 2014, pp. 230–232. EDN UTXOWV (In Russian)

12. Vinogradova E. V., Grigoriev K. A. Voprosy otsenki kachestva sovremennogo betona pri obsledovanii konstruksiy [Issues of Assessing the Quality of Modern Concrete During Structural Inspection], *Razvitie stroitel'nogo kompleksa i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva: sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Development of the Construction Complex and Housing and Communal Services: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference], Moscow, June 30, 2025, Moscow, Sputnik+, 2025, pp. 51–57. EDN OGYPUV (In Russian)

13. Korolev E. V., Belentsov Yu. A. Primenenie teorii informatsii v reshenii zadach stroitel'nogo materialovedeniya [Application of Information Theory in Solving Problems of Construction Materials Science], *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Construction], 2023, no. 3 (56), pp. 13–28. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_13. EDN NDKOJM (In Russian)

14. Belentsov Yu. A., Cherepanova D. A. Vliyanie metodiki kontrolya kachestva betona po fiziko-mekhanicheskim pokazatelyam na nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy [Influence of the Methodology for Controlling Concrete Quality by Physical and Mechanical Parameters on the Reliability of Building Structures], *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2023, no. 5/6 (619), pp. 25–31. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-5/6(619)-25-31, EDN KNYLOR (In Russian)

15. Vinogradova E. V. Problemy upravleniya kachestvom betonnykh rabot [Problems of Quality Management of Concrete Works], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2012, no. 3 (21), pp. 711–714. EDNPJZXVB (In Russian)

16. Belentsov Yu. A., Cherepanova D. A. Perekhod na mnogourovnevuyu sistemu kontrolya prochnosti betona v otvetstvennykh konstruksiyakh [Transition to

a Multi-Level System for Controlling Concrete Strength in Critical Structures], *Stroitel'stvo i arkhitektura* [Construction and Architecture], 2025, vol. 13, no. 4 (49). DOI: 10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0011, EDN EXFMLN (In Russian)

17. EN 12390-3. Metody ispytaniy betona. Chast' 3. Opredelenie prochnosti na szhatie ispytyvaemykh obraztsov [Methods of Testing Concrete. Part 3. Determination of Compressive Strength of Test Specimens] (EN 12390-3:2009+AC:2011). (In Russian)

18. Belentsov Yu. A., et al. Metrologicheskoe obespechenie kontrolya kachestva betonov dlya obespecheniya raschetnogo urovnya nadezhnosti stroitel'noy produktsii [Metrological Support for Quality Control of Concrete to Ensure the Design Level of Reliability of Construction Products], *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Bulletin of Construction Machinery], 2021, no. 4 (1040), pp. 34–36. EDN NQSJMF (In Russian)

19. GOST 27751-2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovanij. Osnovnye polozheniya [Reliability of Building Structures and Foundations. Basic Provisions], dated July 01, 2015, Moscow, Standartinform, 2019. (In Russian)

20. Rzhantsyn A. R. Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruksiy na nadezhnost' [Theory of Reliability Analysis of Building Structures], Moscow, Stroyizdat, 1978, 239 p. (In Russian)

21. EN 1990. Osnovy proektirovaniya konstruksiy [Basis of Structural Design]. (In Russian)

22. Cherepanova D. A. Obespechenie trebuemogo urovnya nadezhnosti pri kontrole kachestva betonov: v 2 chastyakh [Ensuring the Required Level of Reliability in Concrete Quality Control: in 2 parts], *Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva: materialy LXXVI Regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Actual Problems of Modern Construction: Proceedings of the 76th Regional Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and

Young Scientists], St. Petersburg, October 17–20, 2023, St. Petersburg, Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitel'nyj universitet [Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering], 2025, pp. 447–453. EDN ADROUG (In Russian)

23. Belentsov Yu. A., Cherepanova D. A. Sposob kontrolya prochnosti betona [Method for Controlling Concrete Strength], Patent no. 2815345 C1, Russian Federation, IPC G01N 3/08, applicant: FGBOU VO “Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I” [Federal State Budgetary Educational Institution of Higher

Education “Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I”], appl. November 21, 2023, publ. March 13, 2024, EDN GPFCKR (In Russian)

Received: June 10, 2026

Accepted: July 03, 2026

Author’s information:

Dariya A. CHEREPANOVA — Senior Lecturer at the “Building Materials and Technologies” Department, Head of the Quality Department; cherepanova@pgups.ru



УДК 629.421.1+62-831.1

Разработка компьютерной имитационной модели пассажирского поезда для исследования тягово-энергетических процессов на основе средств регистрации параметров движения

П. А. Харченко, Н. В. Гребенников

Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Харченко П. А., Гребенников Н. В. Разработка компьютерной имитационной модели пассажирского поезда для исследования тягово-энергетических процессов на основе средств регистрации параметров движения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 816–829. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-816-829

Аннотация

Цель: разработка и верификация комплексной имитационной компьютерной модели пассажирского поезда, предназначенной для комплексного исследования тяговых, тормозных и энергетических процессов на основе данных реальной эксплуатации. **Методы:** предложена структура имитационной модели, объединяющая механическую подсистему поезда, тяговый привод и тормозное оборудование. Используются комплексы «Универсальный механизм» и MATLAB/Simulink, обеспечивающие совместное моделирование движения поезда по заданному профилю пути и процессов электромеханического преобразования энергии на основе данных регистрации параметров локомотива. **Результаты:** создана комплексная модель, позволяющая воспроизводить движение реального поезда, рассчитывать силы тяги и торможения, скорость, ускорение, динамический рывок, расход электроэнергии на тягу и возврат рекуперированной энергии в контактную сеть. Получены зависимости тормозной силы от давления в тормозных цилиндрах для колодочных и дисковых тормозов. Проверка адекватности модели выполнена путем сопоставления результатов моделирования с данными натурных экспериментов. Установлено, что погрешность расчета скорости, расхода и возврата электроэнергии не превышает 2%. **Практическая значимость:** возможность использования разработанной модели для анализа моделей ведения поездов, применяемых локомотивными бригадами и автоматизированными системами, оценки энергоэффективности, повышения безопасности движения и совершенствования технологий эксплуатации тягового подвижного состава.

Ключевые слова: имитационное моделирование, пассажирский поезд, электровоз ЭП1М, MATLAB/Simulink, «Универсальный механизм», энергоэффективность, рекуперативное торможение, электропневматический тормоз, продольная динамика

Введение

Современная эксплуатация тягового подвижного состава требует перехода от разрозненного анализа отдельных параметров движения к комплексной оценке процессов, определяющих безопасность, энергоэффектив-

ность и комфорт перевозки пассажиров. Особое значение приобретает применение данных средств регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния локомотива, поскольку именно эти данные позволяют воспроизводить реальные

режимы ведения поезда, выявлять особенности работы локомотивной бригады и оценивать последствия управляющих воздействий в системе «человек — поезд». Проведение натурных экспериментов на действующей железнодорожной инфраструктуре связано с рядом ограничений: высокой плотностью движения, необходимостью соблюдения графика, влиянием поездной обстановки и невозможностью многократного воспроизведения одинаковых условий. В этих обстоятельствах имитационное компьютерное моделирование становится эффективным инструментом исследования, позволяющим анализировать электромеханические процессы, тяговые и тормозные режимы, расход и возврат электроэнергии, а также продольно-динамические реакции состава без нарушения требований безопасности движения.

Материалы и методы. Структура и назначение комплексной имитационной компьютерной модели

Для исследования процессов движения поезда разработана комплексная имитационная компьютерная модель, представляющая собой объединение механической и электрической подсистем.

В качестве объекта моделирования принят пассажирский поезд постоянного формирования, состоящий из электровоза переменного тока ЭП1М и 16 вагонов. Состав поезда включает 15 двухэтажных пассажирских вагонов различных типов (купейные, штабной, вагон-ресторан) и специализированный вагон-автомобилевоз [1–4]. Структура модели полностью повторяет структуру эксплуатируемого пассажирского поезда дальнего следования № 36 «Северная Пальмира» сообщением Санкт-Петербург — Адлер и позволяет учитывать влияние массы состава, характеристик автосцепных устройств и параметров тормоз-

ного оборудования на тягово-энергетические характеристики и динамику движения.

При разработке модели использован принцип распределения вычислительных задач между специализированными программными средами. Механические процессы движения поезда реализованы в программном комплексе «Универсальный механизм» (ПК УМ), обладающем возможностями моделирования динамики рельсовых экипажей и продольной динамики поезда. Процессы в тяговом приводе, алгоритмы формирования силы тяги, рекуперации и расчет энергетических показателей реализованы в среде MATLAB/Simulink [5]. Между программными комплексами реализован обмен управляющими и расчетными параметрами через интерфейс взаимодействия моделей — *S*-функцию, которая формируется в интерфейсе связи с внешними библиотеками ПК УМ. В процессе расчета из динамической библиотеки ПК УМ передаются текущие параметры состояния поезда, включая скорость, ускорение и межвагонные силы на автосцепных устройствах, после чего электрическая часть модели определяет реализуемый режим работы тягового оборудования. Полученные значения рассчитанных тяговых и тормозных сил возвращаются в механическую часть модели, где выполняется расчет дальнейшего изменения движения поезда, в результате чего формируется замкнутый цикл моделирования, позволяющий учитывать взаимное влияние энергетических процессов и динамики поезда.

Функциональная реализация модели выполнена посредством пяти взаимосвязанных расчетных блоков (рис. 1). К ним относятся:

- блок исходных параметров, предназначенный для задания характеристик подвижного состава, условий движения и параметров участка пути (план и профиль);

- блок тягово-тормозных характеристик локомотива, обеспечивающий формирование силовых воздействий в режимах тяги и электрического торможения;
- модель электропневматического тормоза, определяющая процессы создания тормозного усилия;
- динамическая модель поезда, реализованная в ПК УМ;
- модуль, выполняющий расчет потребляемой электрической энергии в режиме тяги и энергии, возвращаемой в контактную сеть при рекуперации.

Формирование управляющих воздействий в расчетной модели осуществляется на основе информации о фактических режимах движения

поезда либо результатов предварительных тяговых расчетов. В качестве источников исходных данных могут использоваться сведения, полученные от унифицированной системы автоматизированного ведения поезда (УСАВП), бортовых средств регистрации параметров движения.

Для моделирования процесса движения зарегистрированные данные проходят предварительную обработку и преобразуются в массив параметров, представленный в виде двумерной таблицы Look-Up Table (2D), что позволяет использовать экспериментальные данные в качестве входных воздействий для отдельных расчетных модулей модели. В состав массива данных включаются параметры,

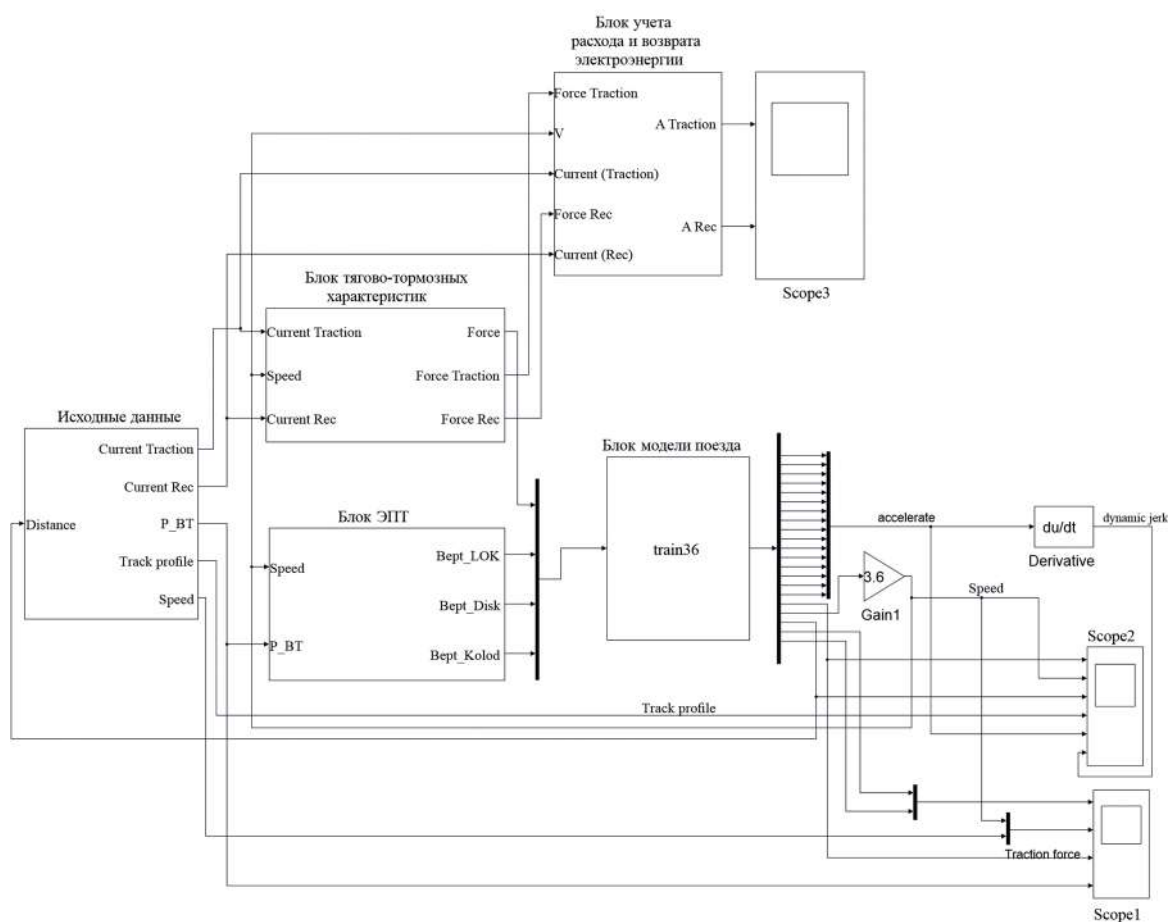


Рис. 1. Модель поезда, разработанная в MATLAB/Simulink

характеризующие состояние силового оборудования и тормозной системы поезда: значения токов тяговых электродвигателей при реализации тягового и рекуперативного режимов, давление в тормозных цилиндрах, скорость движения поезда в зависимости от времени. Данные о продольном профиле пути также задаются в виде Look-Up Table (2D), что позволяет проводить моделирование для различных участков железной дороги.

Компьютерная модель механической части

Для реализации механической части поезда используется модуль UM Train ПК УМ [1], позволяющий формировать расчетную модель поезда как многомассовую систему, состоящую из локомотива и вагонов (рис. 2), соединенных между собой биполярными силовыми элементами, что позволяет исследовать не только скорость движения поезда, но и параметры продольной динамики, то есть величины растягивающих и сжимающих усилий в автосцепках, возникающих при изменении

режима ведения поезда и ускорения каждого вагона в составе поезда.

Сопротивление движению определяется как совокупность основных составляющих, связанных с конструктивными особенностями подвижного состава, скоростью движения и условиями эксплуатации. Расчетные формулы определяются типом подвижной единицы в соответствии с действующей редакцией правил тяговых расчетов [6]. В модели учитываются основное сопротивление движению и сопротивление от профиля пути.

Полученные в результате расчета значения пройденного пути, скорости движения, ускорения и сил взаимодействия передаются в подсистему тягового привода MATLAB/Simulink для формирования управляющих воздействий и определения энергетических характеристик движения.

Компьютерная модель тягового привода

При разработке подсистемы тягового привода детальное воспроизведение всех элементов силовой цепи электровоза было признано

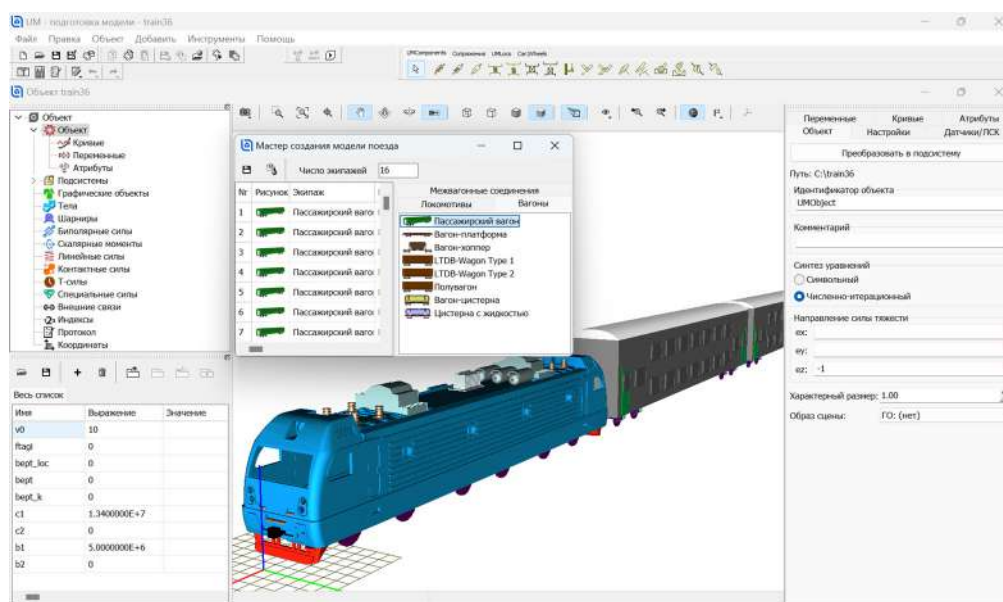


Рис. 2. Создание модели пассажирского поезда в ПК УМ

нецелесообразным, поскольку это привело бы к значительному увеличению сложности модели и снижению быстродействия при несущественном влиянии на решение поставленных задач.

Основным назначением блоков тяги и рекуперативного торможения является воспроизведение внешних характеристик тягового оборудования, определяющих взаимодействие электровоза с механической моделью поезда, поэтому в качестве исходной информации использованы технические характеристики электровоза, приведенные в руководстве по эксплуатации и эксплуатационной документации завода-изготовителя. Моделирование тягового оборудования выполнено в программной среде MATLAB/Simulink [7], а реализация блоков основана на использовании табличного представления характеристик электровоза с применением двумерной таблицы Look-Up Table (2D), что позволяет учитывать нелинейность тяговых характеристик без построения сложной физической модели электрической цепи. В качестве входных параметров используются текущая скорость движения электровоза и значения токов якоря тягового электродвигателя (рис. 3). После обработки входных значений по заданному массиву характеристик $F_k = f(V, I)$ на выходе формируется расчетное значение касательной силы тяги электровоза, которое передается в механическую модель поезда. Расчет режима электродинамического торможения реализован аналогичным способом. Отличие заключается в использовании массива данных, содержащего параметры рекуперативной характеристики электровоза $B_k = f(V, I)$. В качестве результата работы блока определяется величина тормозной силы, возникающей при переводе тяговых электродвигателей в генераторный режим.

Полученное значение силы тяги/торможения передается в качестве входного параметра в модель поезда ПК УМ в подсистему ЭПМ.

Модель блока расчета тормозных сил

При формировании блока расчета тормозных сил использован подход, основанный на представлении тормозной системы поезда в виде совокупности взаимосвязанных элементов, учитывающих процессы формирования тормозного усилия и его передачи от исполнительных устройств к колесным парам подвижного состава. Пассажирские поезда эксплуатируются на электропневматическом тормозе (ЭПТ) [8, 9], особенностью которого является управление исполнительными элементами с помощью электрического сигнала. В связи с этим при моделировании не учитывается время распространения тормозной волны вдоль состава, поскольку скорость передачи электрического сигнала значительно превышает скорость изменения механических процессов при торможении поезда.

Тормозная сила поезда складывается из тормозных сил локомотива $B_k^{\text{лок}}$ и вагонов, оборудованных колодочным $B_k^{\text{ваг}}$ и дисковым $B_{\text{диск}}^{\text{ваг}}$ тормозами:

$$B = B_k^{\text{лок}} + B_k^{\text{ваг}} + B_{\text{диск}}^{\text{ваг}}, \quad (1)$$

Для колодочного тормоза тормозная сила определяется выражением:

$$B_k^{\text{ваг}} = m_k \cdot K_{\text{доп}} \cdot \varphi_k, \quad (2)$$

где m_k — количество тормозных колодок, действующих на ось;

$K_{\text{доп}}$ — допускаемая сила нажатия колодки на колесо, кН;

φ_k — коэффициент трения тормозной колодки.

Для дискового тормоза тормозная сила определяется выражением:

$$B_{\text{диск}}^{\text{ваг}} = m_{\text{н}} \cdot K_{\text{доп}}^{\text{диск}} \cdot \varphi_{\text{н}} \cdot \frac{r}{R}, \quad (3)$$

где $m_{\text{н}}$ — количество тормозных накладок, действующих на диск;

$K_{\text{доп}}^{\text{диск}}$ — допускаемая сила нажатия накладок на диск, кН;

$\varphi_{\text{н}}$ — коэффициент трения тормозной накладки;

r — радиус тормозного диска, м;

R — радиус колеса, м.

Подробное описание математического аппарата расчета тормозных процессов и особенностей формирования тормозной силы приведено в [1, 10, 11].

Зависимости тормозных сил от величины давления в тормозном цилиндре $P_{\text{тц}}$ и скорости движения V определяются следующими уравнениями:

- для электровоза с чугунными тормозными колодками:

$$B_{\text{к}}^{\text{лок}} = 24 \cdot (31,37 \cdot P_{\text{тц}} - 0,694) \times 0,6 \frac{1,6 \cdot (31,37 \cdot P_{\text{тц}} - 0,694) + 100}{8 \cdot (31,37 \cdot P_{\text{тц}} - 0,694) + 100} \times \frac{V + 100}{5V + 100}, \quad (4)$$

- для вагона-автомобилевоза с композиционными тормозными колодками:

$$B_{\text{к}}^{\text{ваг}} = 16 \cdot (29,066 P_{\text{тц}} - 1,628) \times 0,44 \frac{0,1 \cdot (29,066 P_{\text{тц}} - 1,628) + 20}{0,4 \cdot (29,066 P_{\text{тц}} - 1,628) + 20} \times \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150}, \quad (5)$$

- для пассажирского двухэтажного вагона, оборудованного дисковым тормозом с клещевым механизмом WZK36M16X10, оснащенным фрикционными дисковыми накладками

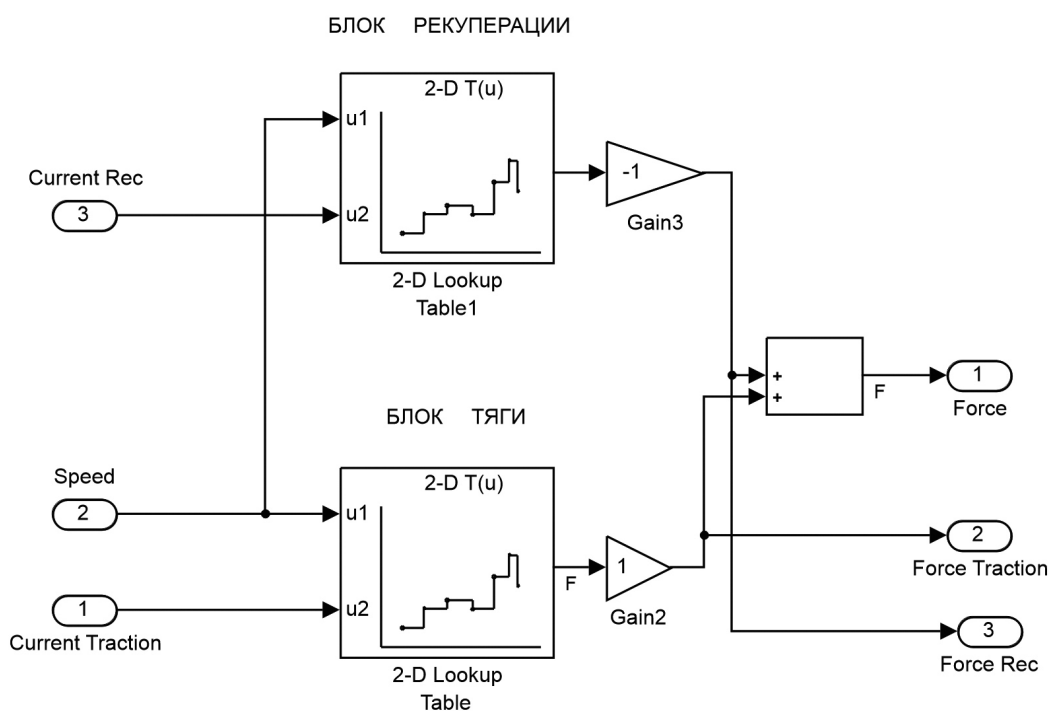


Рис. 3. Блоки тяги и рекуперативного торможения в MATLAB/Simulink

производства немецкого концерна Knorr-Bremse [12, 13]:

$$B_{\text{диск}}^{\text{ваг}} = 16 \cdot (116,25 \cdot P_{\text{тц}} - 6,97) \times \\ \times 0,44 \frac{0,1 \cdot (116,25 \cdot P_{\text{тц}} - 6,97) + 20}{0,4 \cdot (116,25 \cdot P_{\text{тц}} - 6,97) + 20} \times \quad (6) \\ \times \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \cdot \frac{0,32}{0,475}.$$

Реализация расчетного блока выполнена в среде MATLAB/Simulink. Структурно он включает блоки режимов торможения как функции двух переменных $P_{\text{тц}}$ и V . Так как в тормозных цилиндрах используется возвратная пружина, то для исключения отрицательных значений тормозных сил используется блок Compare To Zero совместно с Divide. По-

лученное значение поступает на выходы передачи тормозных сил в механическую модель поезда (рис. 4).

Модель блока учета расхода энергоресурсов на тягу поезда и возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть

При разработке энергетического блока использован подход, основанный на определении энергетического баланса тягового подвижного состава с учетом потерь при преобразовании электрической энергии в механическую работу (рис. 5) и обратном преобразовании при реализации рекуперативного торможения. Методика определения составляющих энергетических потерь и оценки эффективности

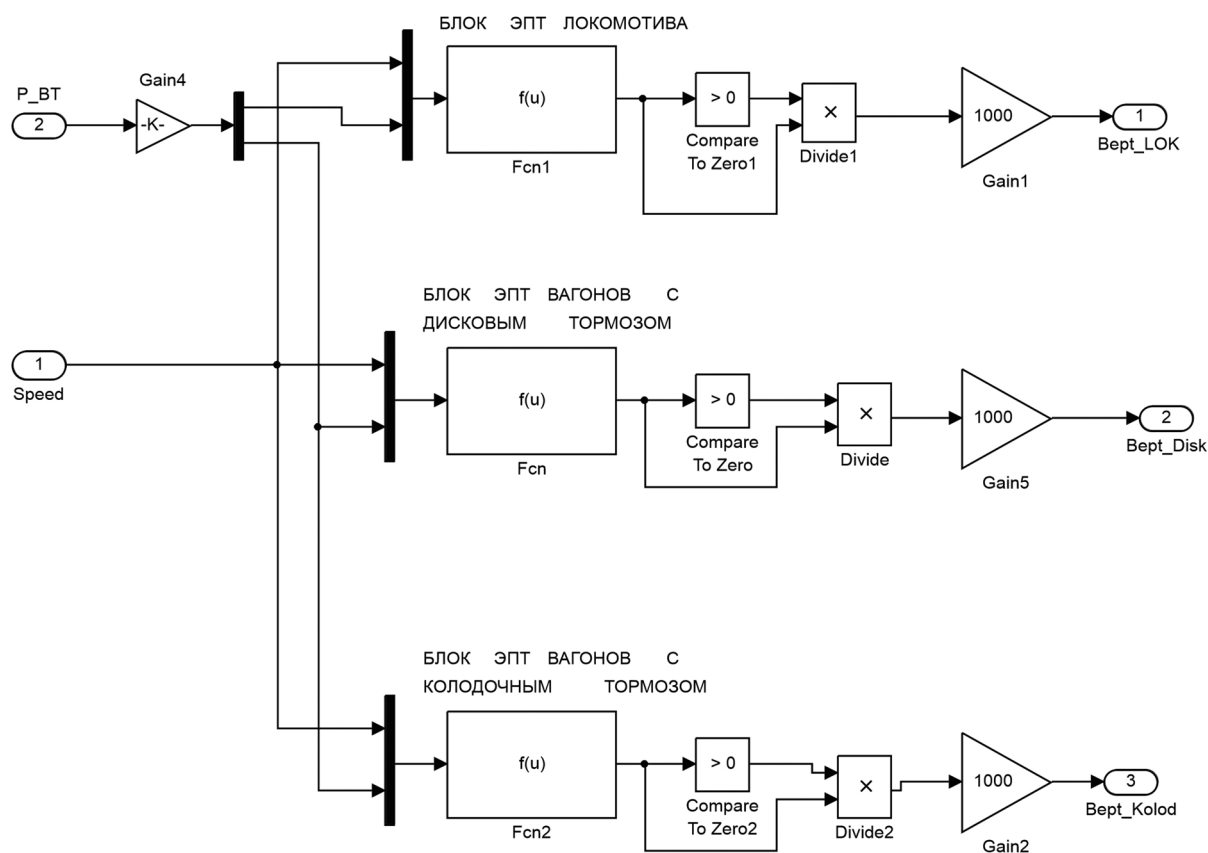


Рис. 4. Блок ЭПТ пассажирского поезда с колодочным и дисковым тормозами

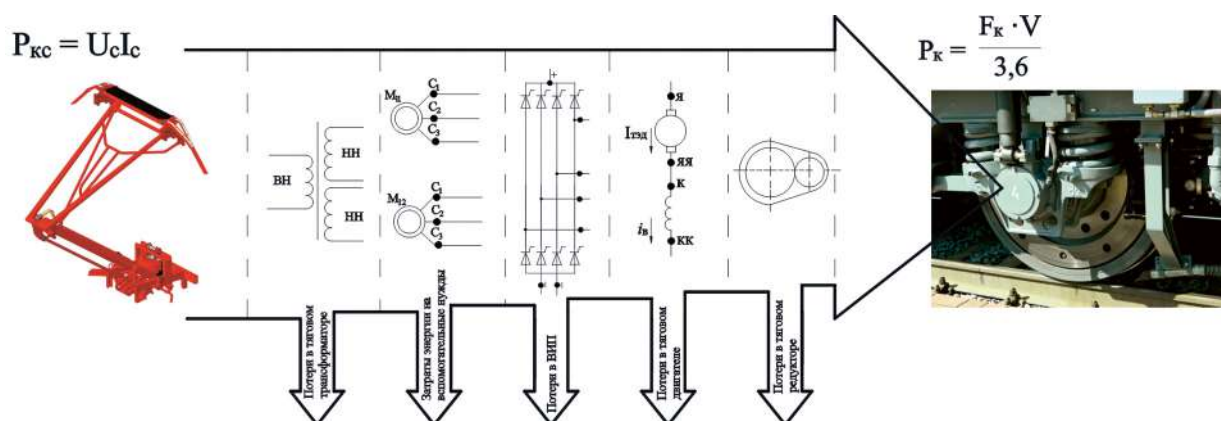


Рис. 5. Процесс преобразования энергии в тяговом электроприводе электровоза

использования энергии подробно рассмотрена в работе [14].

Основной задачей блока является определение количества электрической энергии, потребляемой электровозом в тяговом режиме, а также величины энергии, возвращаемой в контактную сеть при работе тягового привода при рекуперации.

При оценке расхода электрической энергии в режиме тяги учитывается не только мощность, затрачиваемая непосредственно на реализацию касательной силы тяги, но и потребление вспомогательных систем электровоза, к которым относятся цепи управления и диагностики, мотор-компрессор, мотор-вентиляторы и другие агрегаты, обеспечивающие работу электровоза, при этом $P_{\text{всп}}^T$ может задаваться постоянным значением или зависимостью от режима работы оборудования.

$$A_{\text{кc}} = \int \left(\frac{\frac{F_k \cdot V}{3,6 \cdot \eta_{\text{тр}}} + \left(I_a^2 r_a + I_v^2 r_v + 20 \cdot 10^3 \frac{V}{140} \right) \cdot 6}{\eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{вип}}} + P_{\text{всп}}^T \right) dt, \quad (7)$$

где F_k — касательная сила тяги, Н;
 V — скорость движения, км/ч;
 $\eta_{\text{тр}}$ — КПД тягового редуктора;
 I_a — сила тока в обмотке якоря, А;
 I_v — сила тока в обмотке возбуждения, А;

$\eta_{\text{тр}}$ — КПД тягового трансформатора;
 $\eta_{\text{вип}}$ — КПД выпрямительно-инверторного преобразователя;
 $P_{\text{всп}}^T$ — мощность собственных нужд электровоза при движении в режиме тяги, Вт.

Определение количества энергии, возвращаемой в контактную сеть при рекуперативном торможении, выполняется по аналогичному принципу с учетом изменения направления преобразования энергии. В данном режиме кинетическая энергия движущегося поезда преобразуется тяговыми электродвигателями, работающими в генераторном режиме, в электрическую энергию за вычетом энергии, требуемой для вспомогательных систем электровоза:

$$A_{\text{кc}}^{\text{рек}} = \int \left(\left[\frac{B_k \cdot V}{3,6} \cdot \eta_{\text{тр}} - (I_a^2 r_a + I_v^2 r_v + 20 \cdot 10^3 \frac{V}{140}) \cdot 6 \right] \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{вип}} - P_{\text{всп}}^{\text{рек}} \right) dt \quad (8)$$

где B_k — касательная сила рекуперативного торможения, Н;
 V — скорость движения, км/ч;
 I_a — сила тока в обмотке якоря, А;
 I_v — сила тока в обмотке возбуждения, А;

$P_{\text{ВСП}}^{\text{рек}}$ — мощность, затрачиваемая на собственные нужды в режиме рекуперации, Вт.

Разработанный в модели блок позволяет с высокой точностью рассчитывать эти значения в любой момент времени (рис. 6).

Результаты

Проверка работоспособности разработанной комплексной модели выполнена путем моделирования режима движения скорого пассажирского поезда № 36 «Северная Пальмира» на направлении Санкт-Петербург — Адлер (рис. 7). В качестве исследуемого участка при-

нят перегон Лихая — Ростов-Главный Северо-Кавказской железной дороги.

Выбор данного участка обусловлен наличием различных условий эксплуатации, включая изменение профиля пути, реализацию режимов тяги и торможения, а также возможность оценки работы энергетического блока модели в условиях реального движения поезда.

Верификация модели была проведена путем сопоставления характера изменения и численных значений кривой скорости движения поезда, расхода и возврата рекуперированной электроэнергии, полученных по данным средств объективного контроля (УСАВП и КЛУБ-У)

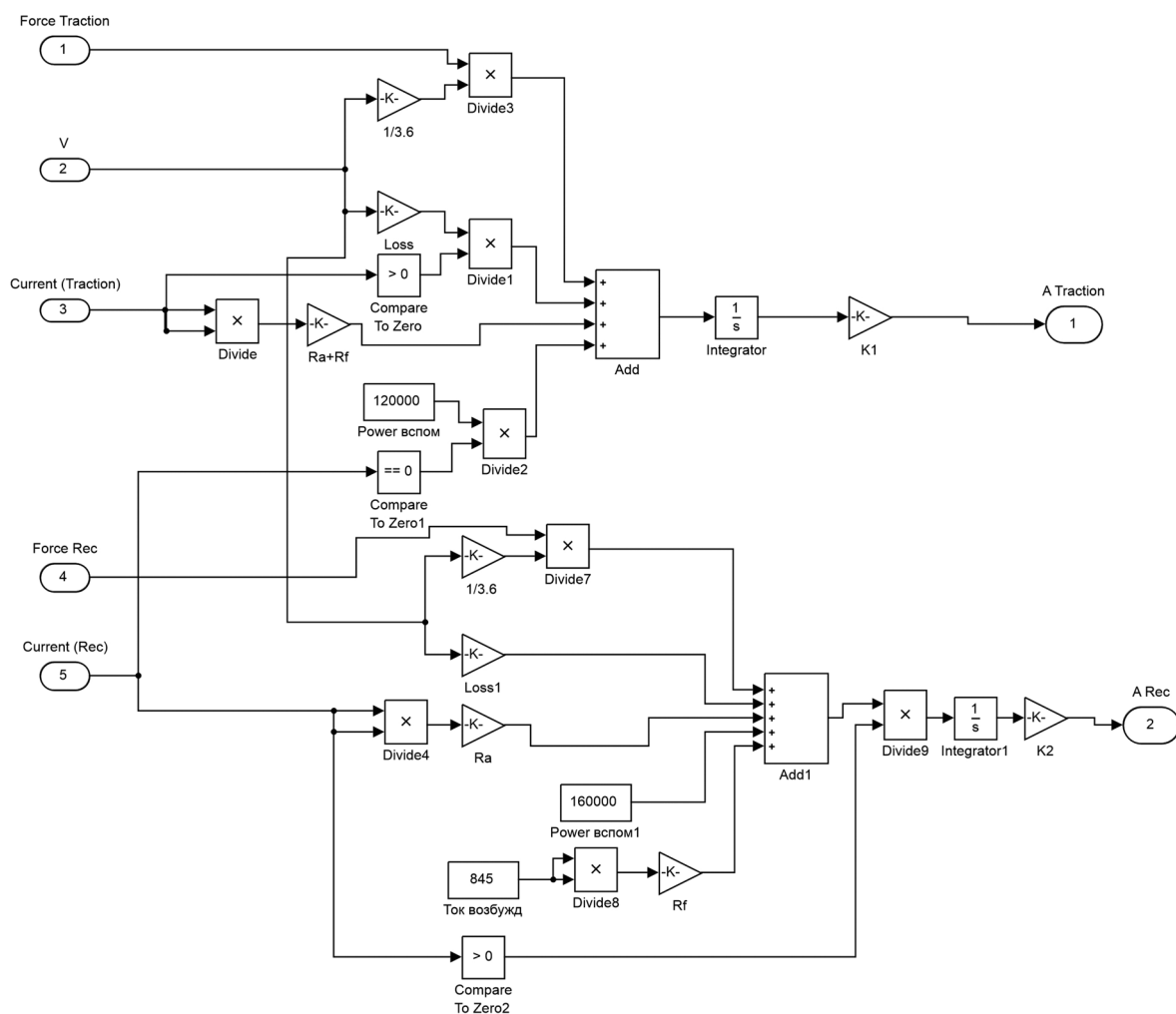


Рис. 6. Модуль учета расхода электроэнергии на тягу поезда и возврата рекуперированной энергии

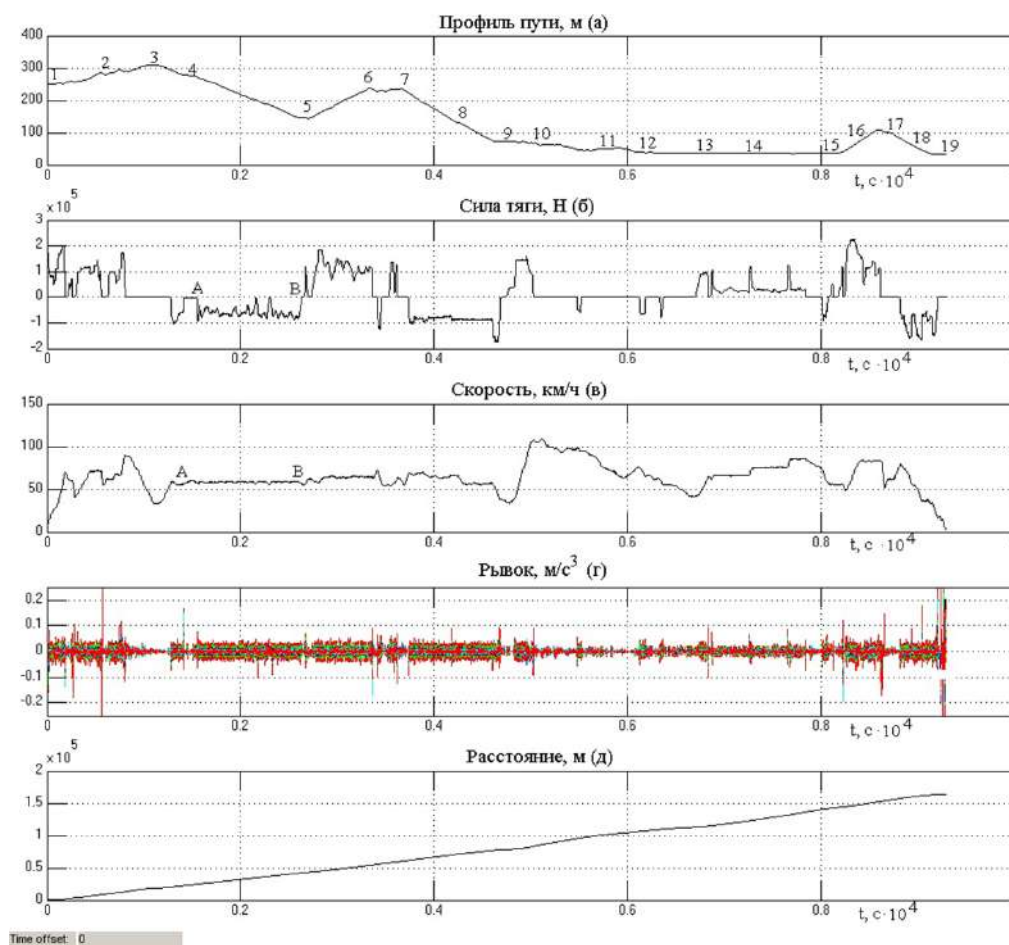


Рис. 7. Результаты моделирования: *a* — профиль пути; *б* — сила тяги; *в* — скорость поезда; *г* — рывок; *д* — расстояние, пройденное поездом

и выходной информации модели на участке Лихая — Ростов-Главный. При анализе графиков скорости, полученных при натурном эксперименте и моделировании, установлено, что погрешность составила 1,65%. Аналогично определена адекватность расчета расхода и возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть. Погрешность составила 1,75%. Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной компьютерной имитационной модели, построенной на основе применения основных положений теории электрической тяги, механики и электротехники. Корректность принятых допущений, структура модели

и стратегия проведения вычислительного эксперимента обеспечивают надежность полученных выводов и соответствие их целям научного исследования.

Заключение

Разработанная комплексная компьютерная имитационная модель позволяет рассматривать движение пассажирского поезда как единую электромеханическую систему, в которой взаимосвязаны процессы управления силовой схемой локомотива, формирования тяговых и тормозных усилий, изменения скорости, продольной динамики и энергопотребления.

Интеграция программных комплексов «Универсальный механизм» и MATLAB/Simulink обеспечила возможность объединения механической, электрической и тормозной подсистем в единую модель с обратными связями. Практическая значимость предложенного подхода определяется тем, что в качестве исходной информации для моделирования могут использоваться данные средств регистрации параметров движения и автоведения. Это позволяет воспроизводить реальные режимы управления поездом, анализировать работу локомотивной бригады, оценивать расход электроэнергии на тягу и возврат рекуперированной энергии в контактную сеть, а также исследовать процессы пневматического и электропневматического торможения. Разработанная модель может быть использована в эксплуатационных локомотивных депо для оценки моделей ведения поезда локомотивными бригадами, формирования рейтингов, выявления энергоэффективных режимов управления и подготовки корректирующих управленческих решений на основе объективных данных средств регистрации параметров движения.

Список источников

1. Харченко П. А., Гребенников Н. В. Разработка компьютерной модели пассажирского поезда на основе данных современных средств регистрации параметров движения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2 (62). С. 38–46. EDN WFEHOR
2. Grebennikov N., Kharchenko P. Development of a Computer Model of a Passenger Train Using Data from Devices for Train Operation Parameters Registration // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021 (Sochi, May 17–21, 2021). Sochi, 2021. Pp. 908–913.
3. ОАО «Тверской вагоностроительный завод»: официальный сайт. URL: <http://www.tvz.ru> (дата обращения: 02.04.2026).
4. Электровоз ЭП1М (ЭП1П). Руководство по эксплуатации. Кн. 1–8. Описание и работа. ИДМБ.661142.004-01РЭ 1–8 (утверждено ОАО «ВЭЛНИИ» 27.12.2007). Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2007. 1308 с.
5. Применение интерфейса UM MATLAB Import при моделировании электромеханической системы поосного регулирования локомотива / Г. А. Федяева [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 4 (40). С. 134–138. EDN RSAXXX
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы (утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р). М.: ОАО «РЖД», 2016. 170 с.
7. Гребенников Н. В., Харченко П. А. Разработка компьютерной модели тягового электропривода пассажирского электровоза ЭП1М // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (53).
8. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (утверждены приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250). Воронеж: ВИННЕР, 2022. 598 с.
9. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава (утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 6–7 мая 2014 года № 60). Новоуральск: Новоуральская типография, 2017. 222 с.
10. Рудов П. К. Расчет тормозов вагонов: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет транспорта. Гомель: БелГУТ, 2010. 90 с.
11. ГОСТ 31402-2013. Цилиндры тормозные железнодорожного подвижного состава. Общие

технические условия: межгосударственный стандарт (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22.11.2013 № 1607-ст, дата введения: 01.07.2014) / разработан ОАО «НИИ вагоностроения». М.: Стандартиформ, 2014. 16 с.

12. Бадамшин Ф. Р., Воробьев А. А., Новосельский И. Ю. Эффективность использования дисковых тормозов на железнодорожном подвижном составе // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: электронный сборник трудов VIII Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 29 ноября 2023 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 135–143.

13. Bremszangeneinheit mit Console fuer Bremsbelag. C160927. 2019. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

14. Гребенников Н. В. Определение коэффициента полезного действия тяговых электрических машин локомотивов в условиях эксплуатации // Транспортное машиностроение. 2023. № 4 (16). С. 31–38. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-4-31-38

Дата поступления: 21.06.2026

Решение о публикации: 08.07.2026

Контактная информация:

ХАРЧЕНКО Павел Алексеевич — младший научный сотрудник; Lrk-9@mail.ru

ГРЕБЕННИКОВ Николай Вячеславович — доктор техн. наук, профессор; grebennikovnv@mail.ru

Development of a Computer Simulation Model of a Passenger Train for Studying Traction and Energy Processes Based on Motion Parameter Recording Systems

P. A. Kharchenko, N. V. Grebennikov

Rostov State Transport University, 2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: *Kharchenko P. A., Grebennikov N. V.* Development of a computer simulation model of a passenger train for studying traction and energy processes based on motion parameter recording systems // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 816–829. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-816-829 (In Russian)

Abstract

Objective: the purpose of the study is to develop and verify a comprehensive computer simulation model of a passenger train intended for the investigation of electromechanical processes during train movement, as well as for the assessment of energy efficiency, longitudinal dynamics, traction, coasting, regenerative braking and electropneumatic braking modes. **Methods:** the study applies computer simulation modeling using the Universal Mechanism and MATLAB/Simulink software packages. The integrated model combines the mechanical, electrical, and braking subsystems of a passenger train consisting of an EPIM electric locomotive and a 16-car trainset. The initial data include technical characteristics of the rolling stock, railway track layout and profile parameters, as well as information obtained from train movement parameter recording and automatic train operation systems. **Results:** a comprehensive model has been developed that makes it possible to reproduce the movement of a real train and calculate traction and braking forces, speed, acceleration, dynamic jerk, electric energy consumption for traction and the return

of regenerated energy to the overhead contact system. Dependencies of braking force on pressure in brake cylinders have been obtained for tread and disc brakes. Verification of the model was carried out by comparing simulation results with full-scale experimental data; it was established that the error in calculating speed, energy consumption and energy recovery does not exceed 2%. **Practical significance:** the developed model can be used to analyze train handling patterns applied by locomotive crews and automated systems, assess energy efficiency, improve traffic safety and enhance the operation technologies of traction rolling stock.

Keywords: simulation modeling, passenger train, EP1M electric locomotive, MATLAB/Simulink, Universal Mechanism, energy efficiency, regenerative braking, electropneumatic brake, longitudinal dynamics

References

1. Kharchenko P. A., Grebennikov N. V. Razrabotka komp'yuternoj modeli passazhirskogo poezda na osnove dannyh sovremennyh sredstv registracii parametrov dvizheniya [Development of a Computer Model of a Passenger Train Based on Data from Modern Devices for Recording Motion Parameters], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of Rostov State Transport University]*, 2016, no. 2 (62), pp. 38–46. EDN WFEHOR (In Russian)
2. Grebennikov N., Kharchenko P. Development of a Computer Model of a Passenger Train Using Data from Devices for Train Operation Parameters Registration, *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2021)*, Sochi, May 17–21, 2021, Sochi, 2021, pp. 908–913.
3. OAO “Tverskoj vagonostroitel'nyj zavod”: ofitsial'nyj sajt [JSC Tver Carriage Works: Official Website]. URL: <http://www.tvz.ru> (accessed: April 02, 2026).
4. Elektrovoz EP1M (EP1P). Rukovodstvo po ekspluatacii. Knigi 1–8. Opisanie i rabota [Electric Locomotive EP1M (EP1P). Operation Manual. Books 1–8. Description and Operation], IDMB.661142.004-01RE 1–8, approved on December 27, 2007, Novocherkassk, VELNII [All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Engineering], 2007, 1308 p. (In Russian)
5. Fedyaeva G. A., et al. Primenenie interfejsa UM MATLAB Import pri modelirovanii elektromekhanicheskoy sistemy poosnogo regulirovaniya lokomotiva [Application of the UM MATLAB Import Interface in Modeling the Electromechanical System of Axle-by-Axle Locomotive Control], *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]*, 2013, no. 4 (40), pp. 134–138. EDN RSAXXX (In Russian)
6. Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty [Rules for Traction Calculations for Train Operations], approved by Order of JSC Russian Railways, dated May 12, 2016, no. 867r, Moscow, JSC Russian Railways, 2016, 170 p. (In Russian)
7. Grebennikov N. V., Kharchenko P. A. Razrabotka komp'yuternoj modeli tyagovogo elektroprivoda passazhirskogo elektrovoza EP1M [Development of a Computer Model of the Traction Electric Drive of the EP1M Passenger Electric Locomotive], *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Rostov State Transport University]*, 2020, no. 4 (53). (In Russian)
8. Pravila tehničeskoy ekspluatacii zhelezných dorog Rossijskoj Federacii [Rules for the Technical Operation of Railways in the Russian Federation], approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022, no. 250, Voronezh, VINNER Publishers, 2022, 598 p. (In Russian)
9. Pravila tehničeskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Rules for Maintenance of Brake Equipment and Brake Control for Railway Rolling Stock], approved by the Council for Railway Transport of the CIS Member States,

Protocol dated May 6–7, 2014, no. 60, Novouralsk, Novouralskaya Tipografiya Publishers, 2017, 222 p. (In Russian)

10. Rudov P. K. Raschet tormozov vagonov: uchebno-metodicheskoe posobie po kursovomu proektirovaniyu [Calculation of Wagon Brakes: Educational and Methodological Guide for Course Design], Ministry of Education of the Republic of Belarus, Belarusian State University of Transport, Gomel, BelGUT Publishers, 2010, 90 p. (In Russian)

11. GOST 31402-2013. Tsilindry tormoznye zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Railway Rolling Stock Brake Cylinders. General Technical Requirements], Interstate Standard, introduced by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, dated November 22, 2013, no. 1607, effective July 01, 2014, developed by JSC Research Institute of Car Building, Moscow, Standartinform, 2014, 16 p. (In Russian)

12. Badamshin F. R., Vorobiev A. A., Novoselsky I. Yu. Effektivnost' ispol'zovaniya diskovykh tormozov na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Efficiency of Using Disc Brakes on Railway Rolling Stock], *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte rel'sovogo podvizhnogo sostava* [Advanced Technologies Used in the Repair of Rail Rolling

Stock], *Electronic Proceedings of the VIII National Scientific and Technical Conference of Students, Master's Students, Postgraduates and Young Scientists*, St. Petersburg, November 29, 2023, St. Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University Publishers, 2024, pp. 135–143. (In Russian)

13. Bremszangeneinheit mit Console fuer Bremsbelag [Brake Caliper Unit with Console for Brake Pad], C160927, 2019, 1 electronic optical disc (CD-ROM).

14. Grebennikov N. V. Opredelenie koefficienta poleznogo dejstviya tyagovykh elektricheskikh mashin lokomotivov v usloviyah ekspluatatsii [Determination of the Efficiency of Traction Electric Machines of Locomotives under Operating Conditions], *Transportnoe mashinostroenie* [Transport Mechanical Engineering], 2023, no. 4 (16), pp. 31–38. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-4-31-38 (In Russian)

Received: June 21, 2026

Accepted: July 08, 2026

Author's information:

Pavel A. KHARCHENKO — Junior Research Assistant; Lrk-9@mail.ru

Nikolay V. GREBENNIKOV — PhD in Engineering, Professor; grebennikovnv@mail.ru

УДК 537.622:621.313.323

Математическое моделирование термической устойчивости постоянных магнитов в условиях внешнего размагничивающего воздействия применительно к тяговому подвижному составу

А. С. Жевак¹, Д. Н. Курилкин²

¹ Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100167, Ташкент, Темир-йулчилар ул., 1

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

Для цитирования: Жевак А. С., Курилкин Д. Н. Математическое моделирование термической устойчивости постоянных магнитов в условиях внешнего размагничивающего воздействия применительно к тяговому подвижному составу // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 830–841. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-830-841

Аннотация

Цель: разработка метода оценки остаточного ресурса постоянных магнитов тяговых синхронных двигателей локомотивов на основе сплава Nd-Fe-B с учетом температурной зависимости магнитных свойств. **Методы:** в качестве методологической основы в исследовании применяется термодинамический анализ температурной эволюции магнитных свойств с использованием аналитических моделей температурной характеристики остаточной магнитной индукции, учитывающих линейные и нелинейные зависимости. **Результаты:** на основании степенной зависимости магнитокристаллической анизотропии от температуры получена аналитическая модель снижения коэрцитивной силы магнитов на основе сплава Nd-Fe-B при нагреве. Введен безразмерный критерий термической устойчивости, который позволяет определять условие необратимого размагничивания через отношение рабочего размагничивающего поля к температурно-зависимой коэрцитивной силе. Предложен способ приведения режимов работы электродвигателя к эквивалентному размагничивающему воздействию через d-составляющую тока статора. Выполнен сравнительный анализ магнитов различных коммерческих классов. Показано, что увеличение энергетического класса не сопровождается ростом термической устойчивости. Введена интегральная мера накопления деградации при циклическом нагреве. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть использованы для оценки термической деградации постоянных магнитов тяговых синхронных двигателей локомотивов, а также для прогнозирования их остаточного ресурса в различных режимах эксплуатации с учетом накопленных повреждений.

Ключевые слова: постоянные магниты, Nd-Fe-B-магниты, магнитокристаллическая анизотропия, коэрцитивная сила, термическая деградация, критерий термической устойчивости, синхронные двигатели с постоянными магнитами, тяговый электродвигатель локомотива

Введение

В настоящее время расширяется применение синхронных двигателей с постоянными магнитами (далее — СДПМ) в качестве тяговых для подвижного состава железных до-

рог [1]. Предполагается, что благодаря значительной удельной мощности и высокому КПД в будущем СДПМ способны вытеснить асинхронные двигатели на железнодорожном транспорте [2]. В исследовании [3] отмечается, что

СДПМ мощностью 200 кВт имеет КПД 97%, в то время как асинхронные аналоги — 92%. Однако существуют факторы, ограничивающие применение СДПМ. Это относительно низкие тепловые свойства стандартных постоянных магнитов Nd-Fe-B, включая риск демагнитизации [4] и зависимость от редкоземельных элементов [5]. По мере приближения температуры магнита к температуре Кюри (T_c) намагниченность уменьшается, при этом скорость уменьшения намагниченности тем больше, чем выше температура (вплоть до нуля при температуре Кюри) [6].

Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от традиционного температурного анализа СДПМ к учету термодинамических процессов, протекающих в магнитных материалах при нагреве и термоциклической нагрузке. В большинстве существующих моделей температурная зависимость магнитных характеристик описывается линейными аппроксимациями, которые справедливы только в ограниченном диапазоне температур и не учитывают необратимую деградацию постоянных магнитов, что приводит к недооценке рисков размагничивания и ошибкам в оценке остаточного ресурса.

Целью исследования является разработка формализованного подхода к оценке термической деградации постоянных магнитов на основе интегральной модели накопления повреждений, которая позволит учитывать нестационарные и циклические режимы эксплуатации.

Во-первых, предложен универсальный материалоориентированный критерий термической устойчивости постоянных магнитов $\eta(T)$. Во-вторых, предложена практическая методика перевода эксплуатационных режимов электродвигателя (через d-составляющую тока и индуктивности в системе dq) в эквивалентное

размагничивающее воздействие $H_{\text{вн}}(I)$ без необходимости полной конструктивной модели машины. В-третьих, введена интегральная мера накопления деградации D , позволяющая учитывать нестационарные и циклические тепловые режимы при оценке остаточного ресурса магнитного материала.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются постоянные магниты на основе сплава Nd-Fe-B, которые широко применяются в СДПМ.

Методологической основой исследования является термодинамический анализ температурной эволюции магнитных свойств с использованием опубликованных данных для постоянных магнитов на основе сплава Nd-Fe-B.

Для описания температурной зависимости остаточной магнитной индукции использованы аналитические модели, которые включают линейные приближения в эксплуатационном температурном диапазоне и нелинейные зависимости, учитывающие критическое поведение магнитных свойств при приближении к температуре Кюри.

Построение температурных зависимостей, расчет относительных изменений магнитных характеристик и визуализации результатов выполнены с использованием стандартных средств математической обработки данных. Полученные результаты интерпретировались с точки зрения их применимости для определения допустимых тепловых режимов и оценки эксплуатационных ограничений постоянных магнитов в составе СДПМ.

В качестве базовой характеристики выбрана температурная зависимость остаточной магнитной индукции $B_r(T)$ как слабо зависящая от конкретной конструкции двигателя, позволяющая сравнивать магнитные материалы в единой

постановке задачи. Поскольку $B_r(T)$ пропорциональна спонтанной намагниченности фазы $Nd_2Fe_{14}B$, ее температурная зависимость может быть аппроксимирована критическим степенным законом для $m(T)$ [7]:

$$m(T) = \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta, \quad (1)$$

где $m(T)$ — нормированная спонтанная намагниченность;

T — температура магнита, К;

T_c — температура Кюри, К;

β — критический показатель температурной зависимости намагниченности;

$$B_r(T) = B_{r0} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta, \quad (2)$$

где $B_r(T)$ — остаточная магнитная индукция при температуре T , Тл;

B_{r0} — остаточная магнитная индукция при температуре, близкой к 0 К, Тл.

Данное соотношение допустимо применять для температур, близких к температуре Кюри. На остальном диапазоне используем линейную аппроксимацию температурной зависимости:

$$B_r(T) = B_{r20} (1 + \alpha_{B_r} (T - T_0)), \quad (3)$$

где $\alpha_{B_r} = -0,0012$ — температурный коэффициент [8];

$T_0 = 20^\circ\text{C}$ — опорная температура;

B_{r20} — остаточная магнитная индукция при температуре T_0 , Тл.

В рамках исследования температура Кюри и величина поля анизотропии при температуре 4,2 К (принятой как приближение к значению при температуре 0 К) выбирались в соответствии с типичными значениями для основной магнитной фазы $Nd_2Fe_{14}B$. Параметры сведены в таблицу, сформированную авторами на

основе источников [7–9]. Эти параметры определяются кристаллохимическими свойствами данной фазы и слабо зависят от коммерческого класса магнита. Фиксация температуры Кюри позволяет рассматривать температурные зависимости в рамках степенного критического приближения для температур выше $T = 0,8 \times T_c = 469$ К, используемого для описания ферромагнитного перехода второго порядка, что позволит рассматривать поведение магнитной фазы независимо от технологических вариаций состава.

Различия между коммерческими классами магнитов (N35–N52), которые представляют собой буквенно-цифровые обозначения неодимовых магнитов с различными техническими характеристиками, в рамках модели учитываются через различие начальной остаточной индукции B_{r0} при неизменных фундаментальных параметрах магнитной фазы.

Согласно подходу Zener — Callen [10–12], константа магнитокристаллической анизотропии первого порядка $K_1(T)$ связывается с нормированной спонтанной намагниченностью $\mu(T)$ соотношением:

$$K_1(T) \propto \mu(T)^3, \quad (4)$$

где $K_1(T)$ — константа магнитокристаллической анизотропии первого порядка;

$\mu(T) = M_s(T) / M_s(0)$ — нормированная спонтанная намагниченность;

$M_s(T)$ — спонтанная намагниченность магнитного материала при температуре T ;

$M_s(0)$ — спонтанная намагниченность при температуре 0 К.

С учетом критического поведения намагниченности

$$\mu(T) \sim \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta$$

получаем:

ТАБЛИЦА. Параметры магнитов, используемые для моделирования

Класс магнита	T_c , К [9]	β [7]	B_{r0} , мТл (при 20 °С) [8]	Величина поля анизотропии при температуре 4,2 К (H_{a0}), кА/м [9]	Внутренняя коэрцитивная сила (H_c), кА/м [8]
N35	586	0,337	1210	25 500	955
N38	586	0,337	1260	25 500	955
N40	586	0,337	1285	25 500	955
N42	586	0,337	1315	25 500	955
N45	586	0,337	1350	25 500	955
N48	586	0,337	1400	25 500	875
N50	586	0,337	1425	25 500	875
N52	586	0,337	1450	25 500	875

$$K_1(T) \sim \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{3\beta}. \quad (5)$$

Поле магнитокристаллической анизотропии определяется соотношением:

$$\mu_0 H_a(T) = \frac{2K_1(T)}{M_s(T)}, \quad (6)$$

где μ_0 — магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума), Гн/м;

$H_a(T)$ — поле магнитокристаллической анизотропии при температуре T , кА/м.

Отсюда следует:

$$H_a(T) = H_{a0} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{2\beta}, \quad (7)$$

где H_{a0} — поле анизотропии при температуре, близкой к 0 К, кА/м.

Таким образом, показатель степени в температурной зависимости поля анизотропии определяется критическим показателем спонтанной намагниченности и для $Nd_2Fe_{14}B$ составляет величину порядка $2\beta = 0,674$.

В настоящей работе критический степенной закон используется на всем диапазоне температур в качестве аппроксимации, что обусловлено его физической согласованностью с поведени-

ем спонтанной намагниченности. В отличие от линейных моделей, приводящих к отрицательным значениям при повышенных температурах, критическая зависимость обеспечивает корректное асимптотическое поведение и сохраняет положительность величины во всем диапазоне температур.

Коэрцитивная сила магнитного материала связана с полем анизотропии соотношением:

$$H_c(T) = \alpha H_a(T), \quad (8)$$

где $\alpha < 1$ — структурный коэффициент, учитывающий микроструктуру и дефекты материала;

$H_c(T)$ — коэрцитивная сила магнитного материала.

В условиях работы двигателя на магнит воздействует эквивалентное размагничивающее поле, обусловленное токами статора и особенностями магнитной цепи $H_{\text{раб}}(I, \omega)$, которое зависит от режима работы двигателя, определяемого током и частотой вращения, где $H_{\text{раб}}(I, \omega)$ — эквивалентное размагничивающее поле, зависящее от тока статора I и угловой скорости вращения ω .

Термическая устойчивость магнита определяется соотношением между эквивалентным

внешним размагничивающим полем и температурно-зависимой коэрцитивной силой материала. Введем безразмерный коэффициент термической устойчивости:

$$\eta(T) = \frac{H_{\text{вн}}(I)}{H_c(T)}, \quad (9)$$

где $H_{\text{вн}}(I)$ — внешняя размагничивающая составляющая рабочего магнитного поля, действующая на постоянный магнит в рабочем режиме двигателя, А/м.

Тогда условие необратимого размагничивания примет следующий вид:

$$\eta(T) > 1. \quad (10)$$

При $\eta(T) = 1$ система находится на границе устойчивости; при $\eta(T) < 1$ необратимого размагничивания не происходит.

Таким образом, температурное снижение поля анизотропии приводит к уменьшению коэрцитивной силы и, соответственно, к уменьшению запаса по устойчивости магнитной системы двигателя.

В СДПМ размагничивание вызывается отрицательной d-составляющей тока статора в системе dq. В рамках магнитной цепи эффективное поле реакции якоря может быть оценено из закона полного тока как пропорциональное току:

$$H_{\text{вн}} = \frac{NI_d}{l_{\text{маг}}}, \quad (11)$$

где N — число витков обмотки статора;

I_d — d-составляющая тока статора, А;

$l_{\text{маг}}$ — эффективная длина магнитного пути в магните, м.

Внешнее размагничивающее поле, которое действует на магнит в условиях эксплуатации и обусловлено конструкцией и режимом работы электрической машины, рассматривается как параметр среды эксплуатации.

В качестве базового объекта был рассмотрен серийный СДПМ мощностью 30 кВт. Несмотря на меньшую мощность по сравнению с тяговыми двигателями локомотива, в нем сохраняется аналогичная физика процессов размагничивания и термической деградации магнитного материала, что позволяет использовать его как репрезентативную модель для анализа.

Значения I_d для режима ослабления поля определены в соответствии с исследованием [13]: установившееся значение $I_{d \text{ уст}} = -60$ А, в переходный период I_d может достигать $I_{d \text{ max}} = -85$ А для четырехполюсного СДПМ мощностью 30 кВт, $L_d = 0,13$ мГн, $\omega = 2000$ об/мин, $\psi_f = 0,062$ Вб, где $I_{d \text{ уст}}$ — значение d-составляющей тока в установившемся режиме; $I_{d \text{ max}}$ — максимальное значение d-составляющей тока в переходном режиме; L_d — индуктивность по d-оси, Гн; ψ_f — потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами, Вб.

Согласно dq-модели [14]:

$$\psi_d = \psi_f + L_d I_d. \quad (12)$$

Изменение потока:

$$\Delta\psi = L_d I_d. \quad (13)$$

Для того чтобы перевести поток в индукцию, вводится эффективное сечение магнитной системы $S_{\text{эф}}$. В отсутствие точной конструктивной геометрии машины данная величина рассматривается как обобщенный параметр, характеризующий распределение магнитного потока в магнитной цепи. Для промышленного СДПМ мощностью 30 кВт оценка эффективного сечения магнитной системы дает диапазон от 0,01 до 0,016 м². В расчетах принято значение $S_{\text{эф}} \approx 0,01$ м² как консервативная оценка нижней границы диапазона. Тогда индукцию можно будет определить по формуле [15]:

$$B = \frac{\Psi}{S}. \quad (14)$$

В реальном двигателе температура не является стационарной величиной $T = T(t)$, тогда:

$$H_c = H_c(T(t)). \quad (15)$$

И критерий $\eta(T)$ становится временным:

$$\eta(T(t)) = \frac{H_{BH}(I)}{H_c(T(t))}. \quad (16)$$

При циклическом нагреве, если:

$$T(t) = T_{\min} + \Delta T \cdot \sin(\omega t), \quad (17)$$

то в течение части цикла может выполняться:

$$\eta(T(t)) > 1 \quad (18)$$

даже при безопасной средней температуре.

Таким образом, деградация магнитного материала может рассматриваться как накопительный процесс, зависящий от времени пребывания системы в области $\eta(T(t)) > 1$:

$$D = \int \Phi(\eta(\tau)) d\tau, \quad (19)$$

где функция повреждения может быть задана как:

$$\Phi(\eta(\tau)) = \begin{cases} 0, & \eta \leq 1 \\ \eta - 1, & \eta > 1 \end{cases}. \quad (20)$$

Это подтверждается исследованиями термоциклической деградации магнитов, например [16], которое показывает, что потери магнитного потока зависят как от амплитуды температурного цикла, так и от числа циклов, что подтверждает необходимость введения интегральной меры накопления повреждений.

Результаты

Зависимость остаточной магнитной индукции от температуры $B_r(T)$, изображенная на рис. 1, характеризует уменьшение спонтанной намагниченности при приближении к температуре Кюри. В области $T \approx 469 \text{ K}$ ($0,8T_c$)

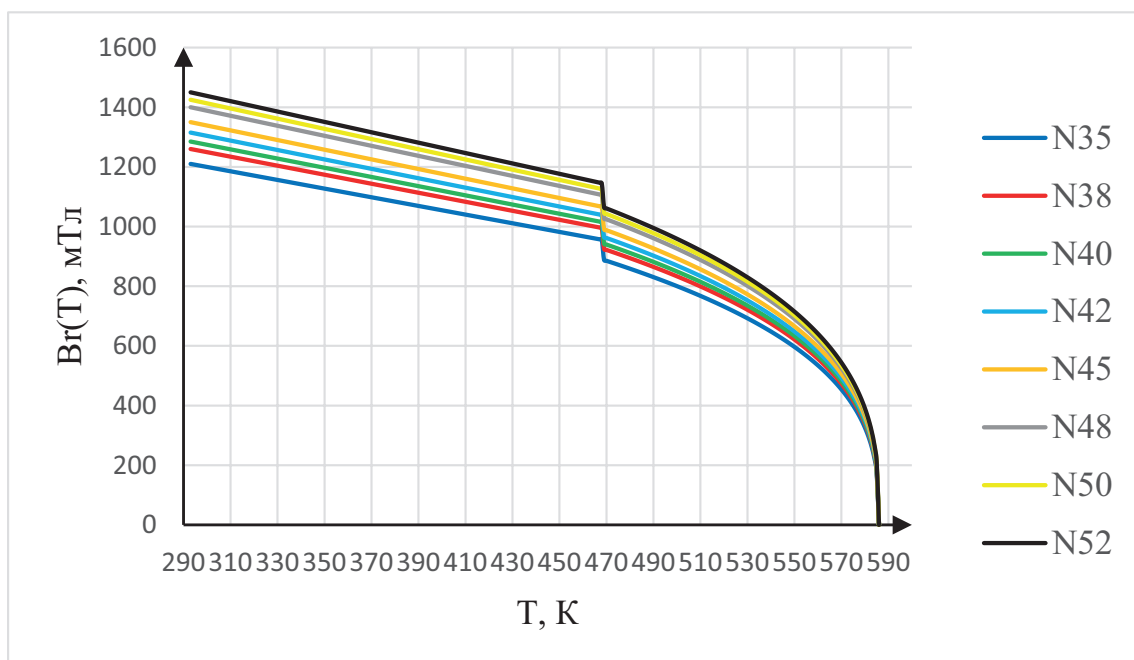


Рис. 1. Зависимость остаточной магнитной индукции от температуры $B_r(T)$ для магнитов системы Nd-Fe-B различных классов (N35–N52)

наблюдается изменение характера зависимости, соответствующее переходу от эксплуатационного температурного диапазона к области проявления критического поведения, в которой происходит ускоренное снижение магнитных свойств.

Однако в реальном электродвигателе размагничивание происходит не только из-за термического разрушения ферромагнитного порядка, но и под действием внешнего размагничивающего магнитного поля, создаваемого токами статора. При повышении температуры снижается коэрцитивная сила магнита, пропорциональная полю анизотропии, что приводит к уменьшению энергетического барьера устойчивости доменной структуры (рис. 2).

Поскольку поле магнитокристаллической анизотропии определяется внутренними свойствами кристаллической фазы Nd-Fe-B, его температурная зависимость в рамках принятой модели является одинаковой для коммерческих классов N35–N52.

Эквивалентное размагничивающее поле в установившемся режиме составляет: $H_{уст} \approx 6,21 \cdot 10^5$ А/м.

Анализ показал, что, несмотря на более высокий остаточный магнитный поток, магниты классов N48–N52 обладают меньшей температурной устойчивостью по сравнению с классами N35–N45 вследствие более низкого значения коэрцитивной силы (см. табл.). При фиксированном размагничивающем воздействии температура потери устойчивости для классов с $H_{cj} = 875$ кА/м ниже, чем для классов с $H_{cj} = 955$ кА/м. Значения коэрцитивной силы H_{cj} взяты по технической документации производителя и соответствуют стандартной температуре испытаний (20 °С). Для калибровки коэффициента α использовано соотношение между расчетным полем анизотропии при 293 К и экспериментальным значением H_{cj} :

$$\alpha_{N48-N52} = \frac{H_{cj}}{H_{a20}} = \frac{875}{15982} = 0,0547$$

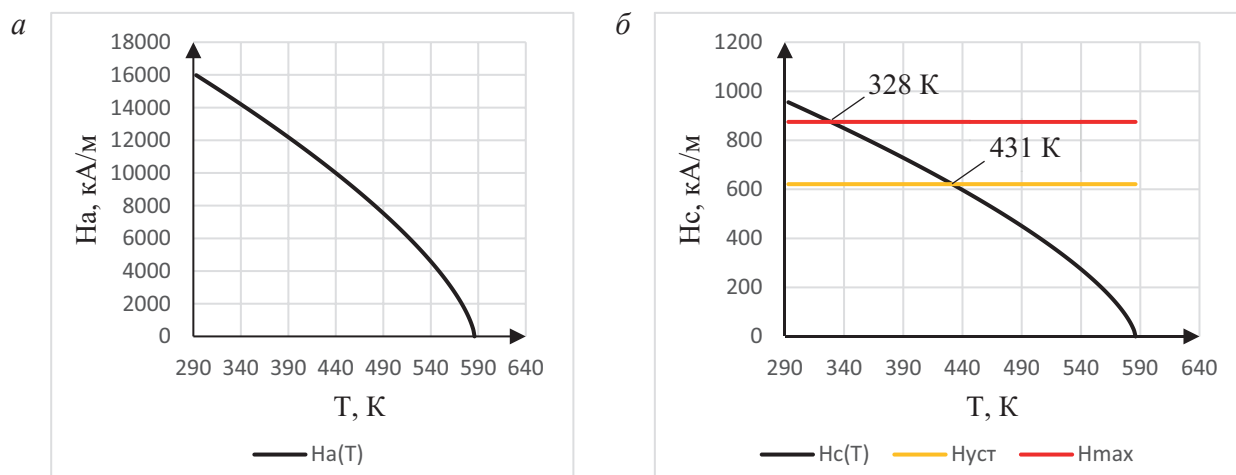


Рис. 2. Зависимости: *a* — величины поля анизотропии от температуры $H_a(T)$; *б* — коэрцитивной силы от температуры $H_c(T)$ для магнитов системы Nd-Fe-B классов N35–N45

$$\text{и } \alpha_{N35-N45} = \frac{H_{cj}}{H_{a20}} = \frac{955}{15982} = 0,0598$$

соответственно.

Для определения критической температуры для магнитов класса N35–N45 и N48–N52 при одинаковом внешнем поле $H_{\text{вн}} = H_{\text{уст}} = 6,21 \cdot 10^5$ А/м, используя формулы (7–9) при $\eta(T) = 1$:

$$T_{\text{крит}}^{N35-N45} = T_C \left(1 - \left(\frac{H_{\text{вн}}}{\alpha H_{a0}} \right)^{\frac{1}{2\beta}} \right) \approx 431 \text{ K},$$

$$T_{\text{крит}}^{N48-N52} \approx 410 \text{ K},$$

где $T_{\text{крит}}^{N35-N45}$ и $T_{\text{крит}}^{N48-N52}$ — критические температуры для магнитов классов N35–N45 и N48–N52 соответственно, при которых внешнее размагничивающее поле становится равным температурно-зависимой коэрцитивной силе магнита, что соответствует границе необратимого размагничивания.

Расчеты показали, что, несмотря на то что магниты классов N48–N52 имеют более высокий остаточный магнитный поток, они обладают меньшей температурной устойчивостью по сравнению с магнитами классов N35–N45 вследствие более низкого значения коэрцитивной силы.

Сопоставление результатов моделирования с данными из технической документации компании Siemens [17] об эксплуатационных ограничениях показывает качественное согласие полученных оценок. Так, согласно этим данным, предельно допустимая температура СДПМ составляет порядка 140 °С (≈ 413 К), что соответствует области начала деградации магнитных свойств.

В рамках предложенной модели критическая температура потери устойчивости для магнитов классов N48–N52 составила примерно

410 К, что близко к указанному эксплуатационному пределу.

Это свидетельствует о том, что температурные ограничения, задаваемые на уровне электродвигателя, могут быть связаны с потерей устойчивости магнитного материала, описываемой предложенным критерием.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что снижение термической устойчивости постоянных магнитов происходит раньше достижения температуры Кюри и определяется не только уменьшением остаточной магнитной индукции, но и снижением коэрцитивной силы под действием внешнего размагничивающего поля.

В отличие от линейных температурных аппроксимаций, которые активно применяются в инженерных расчетах, степенная зависимость, основанная на подходе Zener — Callen, позволяет корректно учитывать критическое поведение магнитокристаллической анизотропии в области повышенных температур. Это приводит к более консервативной и физически обоснованной оценке риска размагничивания.

Сравнение коммерческих классов магнитов системы Nd-Fe-B показало, что, несмотря на более высокий энергетический класс (N48–N52), магниты теряют устойчивость при более низких температурах по сравнению с классами N35–N45 при одинаковом размагничивающем воздействии, что вызвано меньшей внутренней коэрцитивной силой таких магнитов.

Введение безразмерного коэффициента устойчивости $\eta(T)$ позволяет рассматривать электродвигатель как внешнюю по отношению к магниту систему, которая характеризуется эквивалентным размагничивающим полем. Благодаря этому модель может применяться к СДПМ различной мощности, конструкции

и назначения без необходимости построения детальной электромагнитной модели.

Показано, что при циклическом нагреве система может периодически входить в область $\eta(T(t)) > 1$ даже при безопасной средней температуре, что приводит к накопительному характеру деградации, описываемому интегральной мерой (19), которая учитывает продолжительность пребывания системы в критической области.

Выводы

Получена аналитическая зависимость коэрцитивной силы постоянных магнитов системы Nd-Fe-B от температуры на основе критического закона температурной зависимости спонтанной намагниченности, которая учитывает нелинейное снижение поля магнитокристаллической анизотропии при приближении к температуре Кюри.

Предложен безразмерный критерий термической устойчивости. Он позволяет формализовать условие необратимого размагничивания и оценивать запас устойчивости магнитного материала при заданном внешнем размагничивающем воздействии.

Разработан способ приведения эксплуатационных режимов синхронных двигателей к эквивалентному размагничивающему полю через d-составляющую тока статора, что позволяет учитывать влияние режима работы без построения полной электромагнитной модели электрического двигателя.

Установлено, что потеря термической устойчивости магнитов происходит при температурах, существенно более низких, чем температура Кюри, вследствие ускоренного снижения коэрцитивной силы при нагреве.

Показано, что магниты более высоких энергетических классов (N48–N52), обладая большей остаточной магнитной индукцией,

характеризуются меньшей термической устойчивостью по сравнению с классами N35–N45 при одинаковом внешнем размагничивающем поле, что связано с более низким значением внутренней коэрцитивной силы.

Введена интегральная мера накопления деградации, которая позволит учитывать циклические тепловые режимы и оценивать влияние времени пребывания системы в области $\eta(T(t)) > 1$ на остаточный ресурс магнитного материала.

Предложенный подход формирует основу универсальной методики оценки термической устойчивости и остаточного ресурса постоянных магнитов в составе электротехнических систем.

Список источников

1. Колпахчян П. Г., Рязанов А. Ю. Тяговый электродвигатель с постоянными магнитами на роторе: характеристика и перспективы применения в транспортной отрасли // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. № 2. С. 145–157.
2. State-of-the-Art Review of Railway Traction Motors for Distributed Traction Considering South Korean High-Speed Railway / S. Paul [et al.] // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Pp. 14623–14642.
3. Polater N., Tricoli P. Technical Review of Traction Drive Systems for Light Railways // Energies. 2022. Vol. 15, no. 9. Art. № 3187.
4. Jin Yang Y., Min You Y. A Study on the Performance and Demagnetization Characteristics of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor According to the Arrangement of Permanent Magnets // Journal of Magnetism. 2025. Vol. 30, no. 2. Pp. 119–130.
5. Demagnetization Risk Mitigation for a Traction IPMSM Using Mixed-Magnet Configurations / R. Nasirizarandi [et al.] // International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2024. Pp. 1–6.
6. A Study of the Thermal Demagnetisation Behaviour of Nd-Fe-B Sintered Magnets by a Magnetic

Field Mapping System / A. J. Williams [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. Vol. 242. Pp. 1378–1380.

7. Westmoreland S. Atomistic Calculations of Magnetic Properties of Rare-Earth Transition-Metal Permanent Magnets: diss. University of York, 2018.

8. Neodymium Iron Boron Magnets. URL: <https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/> (дата обращения: 18.02.2026).

9. Свойства спеченных магнитов (Pr, Nd, Ce, Dy) (Fe, Co)B, полученных из неочищенных редкоземельных металлов / М. В. Потапов [и др.] // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). С. 65–74.

10. Callen H. B. Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics // John Wiley & Sons. 1993. Vol. 2.

11. Zener C. Classical Theory of the Temperature Dependence of Magnetic Anisotropy Energy // Physical Review. 1954. Vol. 96, no. 5. Art. № 1335.

12. Miura D., Sakuma A. Power Law Analysis for Temperature Dependence of Magnetocrystalline Anisotropy Constants of Nd₂Fe₁₄B Magnets // AIP Advances. 2018. Vol. 8, no. 7.

13. Field Weakening Operation Control Strategies of PMSM Based on Feedback Linearization / K. Zhou [et al.] // Energies, 2019. Vol. 12, no. 23. Art. 4526.

14. Pillay P., Krishnan R. Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives. I. The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive // IEEE Transactions on Industry Applications. 1989. Vol. 25, no. 2. Pp. 265–273.

15. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. Electric Machinery. 2003.

16. Effect of heat treatment on microstructure and thermal stability of Nd-Fe-B sintered magnets / Y. Liu [et al.] // IEEE transactions on magnetics. 2011. Vol. 47, no. 10. Pp. 3270–3272.

17. Siemens AG. 1FT7 Synchronous Motors: Operating Instructions. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/487/96807487/att_61517/v1/1FT7_BE_1007_de_en_fr_es_it.pdf (дата обращения: 30.04.2026).

Дата поступления: 11.06.2026

Решение о публикации: 09.07.2026

Контактная информация:

ЖЕВАК Александра Сергеевна — ассистент;
a-b.zhevak@yandex.ru

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — кандидат
техн. наук, доцент, заведующий кафедрой;
kurilkin@pgups.ru

Mathematical Modeling of the Thermal Stability of Permanent Magnets under External Demagnetizing Fields for Traction Rolling Stock

A. S. Zhevak¹, D. N. Kurilkin²

¹ Tashkent State Transport University, 1 Temiryulchilar st., Tashkent, 100167, Uzbekistan

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Zhevak A. S., Kurilkin D. N. Mathematical Modeling of the Thermal Stability of Permanent Magnets under External Demagnetizing Fields for Traction Rolling Stock // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 830–841. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-830-841 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop a method for assessing the residual life of permanent magnets in traction synchronous motors of locomotives based on Nd–Fe–B alloys, taking into account the temperature dependence of magnetic properties. **Methods:** the study is based on a thermodynamic analysis of the temperature evolution of magnetic properties using analytical models of the temperature dependence of residual magnetic flux density, incorporating both linear and nonlinear relationships. **Results:** an analytical model describing the reduction of coercivity in Nd–Fe–B magnets under heating has been derived based on a power-law dependence of magnetocrystalline anisotropy on temperature. A dimensionless thermal stability criterion is introduced, enabling the determination of irreversible demagnetization conditions through the ratio of the operating demagnetizing field to the temperature-dependent coercivity. A method is proposed for converting motor operating conditions into an equivalent demagnetizing field via the d-axis component of the stator current. A comparative analysis of magnets of different commercial grades shows that an increase in energy product is not accompanied by improved thermal stability. An integral measure of degradation accumulation under cyclic heating is also introduced. **Practical significance:** the results can be used to assess thermal degradation of permanent magnets in traction synchronous motors of locomotives and to predict their residual life under various operating conditions, taking into account accumulated damage.

Keywords: permanent magnets, Nd–Fe–B magnets, magnetocrystalline anisotropy, coercivity, thermal degradation, thermal stability criterion, permanent magnet synchronous motors, locomotive traction motor

References

1. Kolpakhchyan P. G., Ryazanov A. Yu. Tyagovyy elektrodvigatel s postoyannymi magnitami na rotore: kharakteristika i perspektivy primeneniya v transportnoy otrasli [Traction Electric Motor with Permanent Magnets on the Rotor: Characteristics and Application Prospects in the Transport Industry], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Research Results]*, 2025, no. 2, pp. 145–157. (In Russian)
2. Paul S., et al. State-of-the-Art Review of Railway Traction Motors for Distributed Traction Considering South Korean High-Speed Railway, *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 14623–14642.
3. Polater N., Tricoli P. Technical Review of Traction Drive Systems for Light Railways, *Energies*, 2022, vol. 15, no. 9, art. no. 3187.
4. Jin Yang Y., Min You Y. A. Study on the Performance and Demagnetization Characteristics of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor According to the Arrangement of Permanent Magnets, *Journal of Magnetism*, 2025, vol. 30, no. 2, pp. 119–130.
5. Nasirizarandi R., et al. Demagnetization Risk Mitigation for a Traction IPMSM Using Mixed-Magnet Configurations, *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), IEEE*, 2024, pp. 1–6.
6. Williams A. J., et al. A Study of the Thermal Demagnetisation Behaviour of Nd–Fe–B Sintered Magnets by a Magnetic Field Mapping System, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, vol. 242, pp. 1378–1380.
7. Westmoreland S. Atomistic Calculations of Magnetic Properties of Rare-Earth Transition-Metal Permanent Magnets: diss., University of York, 2018.
8. Neodymium Iron Boron Magnets. URL: <https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/> (accessed: February 18, 2026).
9. Potapov M. V., et al. Svoystva spechennykh magnitov (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B, poluchennykh iz neochishchennykh redkozemelnykh metallov [Properties of Sintered (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B Magnets Produced from Unpurified Rare-Earth Metals], *Trudy VIAM [Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials]*, 2025, no. 2 (144), pp. 65–74. (In Russian)

10. Callen H. B., Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics, John Wiley & Sons, 1993, vol. 2.
11. Zener C. Classical Theory of the Temperature Dependence of Magnetic Anisotropy Energy, *Physical Review*, 1954, vol. 96, no. 5, art. no. 1335.
12. Miura D., Sakuma A. Power Law Analysis for Temperature Dependence of Magnetocrystalline Anisotropy Constants of Nd₂Fe₁₄B Magnets, *AIP Advances*, 2018, vol. 8, no. 7.
13. Zhou K., et al. Field Weakening Operation Control Strategies of PMSM Based on Feedback Linearization, *Energies*, 2019, vol. 12, no. 23, art. 4526.
14. Pillay P., Krishnan R. Modeling, Simulation and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives. I. The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 265–273.
15. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. Electric Machinery, 2003.
16. Liu Y., et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Thermal Stability of Nd–Fe–B Sintered Magnets, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, vol. 47, no. 10, pp. 3270–3272.
17. Siemens AG. 1FT7 Synchronous Motors: Operating Instructions. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/487/96807487/att_61517/v1/1FT7_BE_1007_de_en_fr_es_it.pdf (accessed: April 30, 2026).

Received: June 11, 2026

Accepted: July 09, 2026

Author's information:

Aleksandra S. ZHEVAK — Assistant;
a-b.zhevak@yandex.ru

Dmitry N. KURILKIN — PhD in Engineering,
Associate Professor, Head of the Chair;
kurilkin@pgups.ru

УДК 621.891.22

Получение износостойких покрытий при лазерной наплавке порошком на основе железа с добавлением наночастиц карбида тантала

В. П. Бирюков, Я. А. Горюнов

Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

Для цитирования: Бирюков В. П., Горюнов Я. А. Получение износостойких покрытий при лазерной наплавке порошком на основе железа с добавлением наночастиц карбида тантала Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 3. С. 842–850. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-842-850

Аннотация

Цель: исследование посвящено определению оптимального количества наночастиц карбида тантала в составе порошкового материала для повышения механических и триботехнических характеристик металлокерамического покрытия на основе железа, полученного при лазерной наплавке. **Методы:** лазерная наплавка образцов проводилась круглым и колеблющимся пятном при плотности энергии излучения 21–48 Вт·с/мм². Металлографический анализ наплавленных покрытий был выполнен с использованием оптической системы МС-1000 и цифрового микроскопа АМ-419. Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3 с цифровой камерой МС-8,3С при нагрузке 0,98 Н. Триботехнические испытания были выполнены на машине трения с вертикальной осью вращения шпинделя по схеме: плоский прямоугольный образец с покрытием — торцевая поверхность контробразца из стали 45. Измерение моментов трения и усилия нагружения образцов проводилось с применением тензодатчиков в непрерывном режиме с отображением данных на дисплее персонального компьютера. С помощью бесконтактного индуктивного датчика определяли частоту вращения шпинделя с выводом данных на цифровой тахометр. **Результаты:** по полученным данным исследований установлено, что максимальную износостойкость демонстрировали металлокерамические покрытия, содержавшие 10 мас. % наночастиц карбида тантала в составе наплавляемой шихты. Тем не менее высокая стоимость делает применение данного порошкового материала экономически нецелесообразным. В связи с этим с учетом себестоимости процесса лазерной наплавки оптимальным решением признаны образцы с содержанием наночастиц карбида тантала до 4 мас. %, которые незначительно уступали образцам с большим содержанием нанокарбидов тантала. **Практическая значимость:** разработанная технология может быть использована для наплавки шеек валов электрических машин вагонов метрополитена и других деталей, требующих восстановления изношенных поверхностей. Показана возможность повышения износостойкости восстановленной поверхности шеек валов электрических машин путем добавления в состав наплавляемого материала наночастиц карбида тантала.

Ключевые слова: лазерная наплавка, восстановление поверхности, износостойкость, микроструктура, микротвердость, интенсивность изнашивания, задиростойкость, электрические машины, нанокарбид тантала

Введение

Длительность эксплуатации подвижного состава тесно связана с износом деталей и их периодической заменой. Высокая стоимость приобретения новых комплектующих делает экономически целесообразным развитие технологий по восстановлению деталей для повышения срока их эксплуатации. В настоящее время существует несколько подходов к решению данной задачи. Среди передовых технологий, применяемых для восстановления изношенных поверхностей, особое место занимает лазерная наплавка. Ключевыми преимуществами данной технологии являются бесконтактное воздействие, высокая степень автоматизации, возможность обработки труднодоступных участков и формирование однородного наплавленного слоя. Непрерывный поиск инноваций в сфере лазерных технологий для увеличения износостойкости изделий привел к разработке различных многокомпонентных износостойких покрытий [1, 2]. Механические характеристики таких покрытий могут быть значительно выше, чем у основного материала [3]. Улучшение эксплуатационных характеристик достигается за счет введения в состав наплавленного материала частиц титана, тантала, вольфрама, ванадия и других карбидообразующих элементов [4–12]. Однако стоит отметить, что высокое содержание карбидообразующих элементов в результате наплавки лазерным лучом может не только существенно увеличить износостойкость, но и способствовать повышению вероятности трещинообразования в наплавленном слое [13]. Кроме того, такие покрытия характеризуются высокой стоимостью. Небольшое содержание карбидов в порошковом материале позволяет получать однородное износостойкое покрытие, не образуя пор и трещин [14]. Обнаружено, что добавление 1–15 мас.% карбида титана в состав наплавленного покрытия спо-

собствует измельчению зерен и достижению более однородной микроструктуры наплавленных валиков [15–16].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований был подготовлен коррозионностойкий порошок ПР-20Х13Н2 с размером частиц 40–100 мкм. Далее в состав данного порошка были введены 1, 4 и 10 мас.% наночастицы карбида тантала (нано-TaC). Затем после тщательного перемешивания порошковые смеси были смешаны с водным раствором оксиэтилцеллюлозы и нанесены на поверхности образцов из стали 38ХГТ (35–37 HRC). После того как порошковые смеси были нанесены, образцы помещали в сушильный шкаф на два часа при температуре 70 °С. Процесс нанесения покрытий осуществлялся с применением автоматизированного лазерного технологического комплекса ИМАШ РАН [17] при плотности энергии излучения 21–48 Вт·с/мм² и скорости перемещения луча 5–7 м/с. Диаметр лазерного пятна на поверхности варьировался в пределах 2,5–3,5 мм.

Лазерная наплавка осуществлялась расфокусированным и колеблющимся лучом с частотой колебаний 215 Гц. Металлографические исследования были проведены с использованием металлографической системы МС-1000, цифрового микроскопа и микротвердомера ПМТ-3 с цифровой камерой при нагрузке на алмазный индентор 0,98 Н. Испытания для определения триботехнических характеристик были выполнены по схеме «торец кольцевой оправки — широкая сторона прямоугольного образца». Оправка была изготовлена из стали 45, которая прошла закалку при 855 °С в течение 1 часа, низкий отпуск при 250 °С в течение 2 часов и охлаждение в воде. Твердость оправки составляла 48–52 HRC.

ТАБЛИЦА 1. Элементный состав порошка ПР-20Х13Н2

Материал	Содержание элементов, мас. %					
	C	Cr	Si	Mn	Ni	Fe
ПР-20Х13Н2	< 0,2	12,0–14,0	< 0,8	< 1,0	1,2–2,5	осн.

Испытания проводились в диапазоне приложенных нагрузок 0,8–2,2 МПа и скоростей скольжения в пределах 0,2–1,4 м/с. Перед проведением испытаний на поверхность трения каждого образца была нанесена смазка «Литол-24». Регистрирование изменения моментов трения и усилия прижима осуществлялось в режиме реального времени посредством отображения на экране персонального компьютера. Испытания выполняли при нормальном атмосферном давлении и температуре. Перед испытаниями поверхности всех образцов обрабатывались наждачной бумагой зернистостью Р600 на шлифовально-полировальном станке.

Результаты и обсуждения

По результатам металлографических исследований установлено, что высота и ширина наплавленных валиков при обработке расфокусированным и колеблющимся лучом составила 0,4–0,65, 1,9–2,5 мм и 0,39–0,64, 3,5–4,5 мм соответственно. На рис. 1 показаны зоны сплавления покрытий с основой, при анализе которых установлено, что зона проплавления основы составляла 0,1–1,5 (рис. 1а) и 0,03–0,05 (рис. 1б) мм при наплавке дефокусированным и колеблющимся лучом соответственно на различных режимах обработки. Применение поперечных колебаний лазерного луча при наплавке приводило к увеличению площади сечения единичного наплавленного валика в 1,4–1,9 раза в сравнении с наплавкой дефокусированным пучком. Замечено, что степень увеличения

сечения валика коррелировала с плотностью энергии лазерного излучения.

Микроструктуры наплавленных валиков, полученных при обработке расфокусированным и колеблющимся лучом, приведены на рис. 2. На изображениях отчетливо видна структура, состоящая преимущественно из мартенсита отпуска. При оценке микроструктуры образцов, подвергнутых обработке расфокусированным и колеблющимся лучом, установлено, что зерна соответствуют баллам № 2 и № 3 соответственно.

Отмечено, что при нанесении соседней дорожки происходил нагрев рядом лежащей дорожки до температуры около 200 °С, что вызвало снижение микротвердости основы до 4000–4500 МПа.

На рис. 3 представлен сравнительный график микротвердости единичных наплавленных валиков порошком ПР-20Х13Н2 с добавлением 1, 4 и 10 мас.% нано-ТаС, значения которых составили 5800–6000, 5900–6300, 6700–7200 и 6900–7300 МПа соответственно. Введение в шихту наночастиц карбида позволило увеличить микротвердость зон наплавки на 1100–1300 МПа по сравнению с исходным порошком.

На рис. 4 приведены графики изменения давления заедания от скорости скольжения. Наихудшие результаты были получены для образцов исходной стали 38ХГТ. Максимальной стойкостью к заеданию обладали образцы с покрытием ПР-20Х13Н2 + 10 % нано-ТаС. Стоит отметить, что образцы с покрытием ПР-20Х13Н2 и ПР-20Х13Н2 + 1 % нано-ТаС

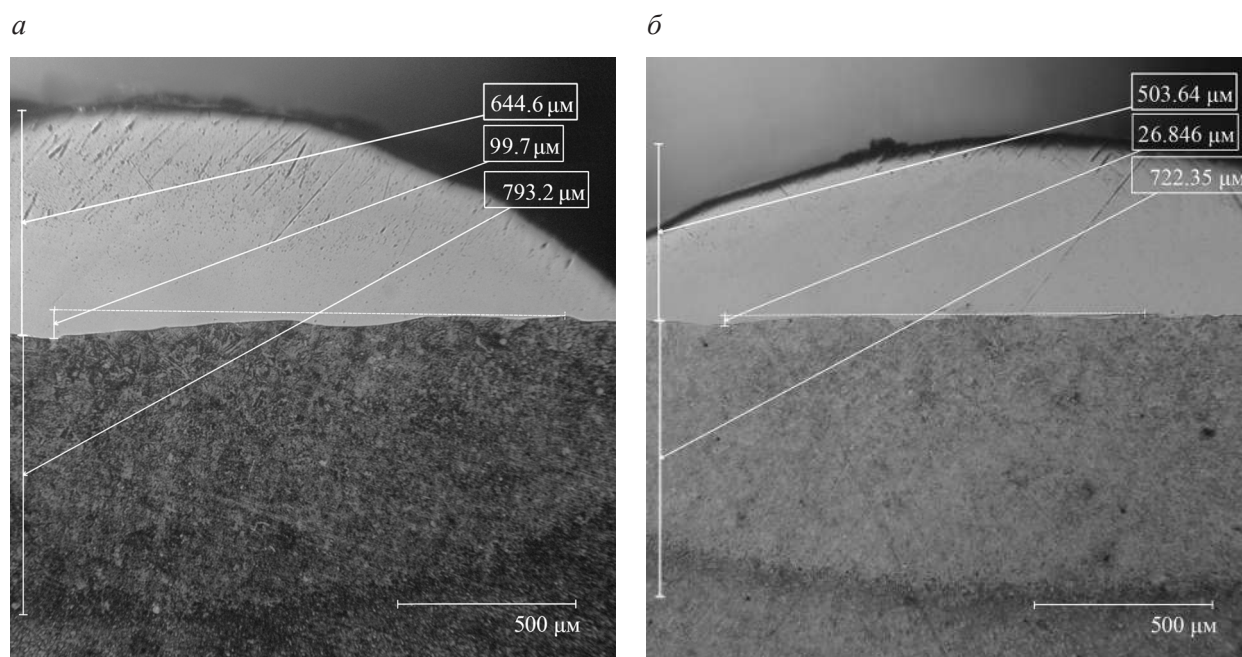


Рис. 1. Микроструктуры наплавленных валиков:
а — образец, обработанный дефокусированным лучом;
б — образец, обработанный колеблющимся лучом

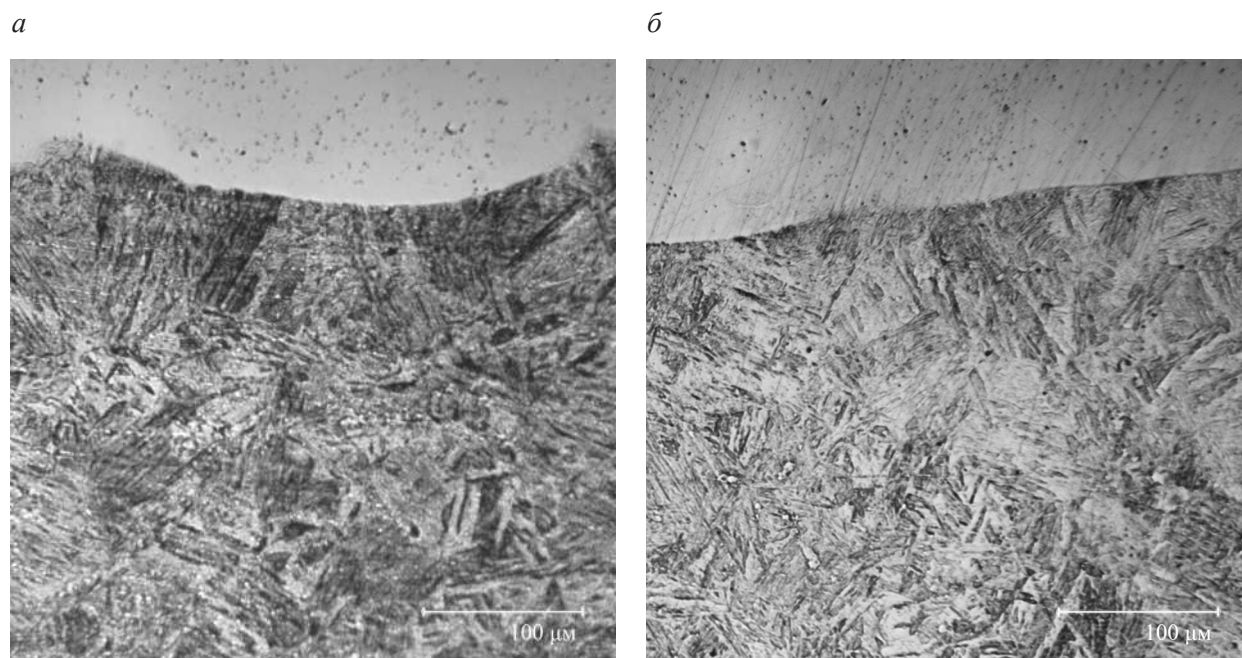


Рис. 2. Микроструктуры подповерхностных зон наплавленных валиков:
а — образец, обработанный дефокусированным лучом;
б — образец, обработанный колеблющимся лучом

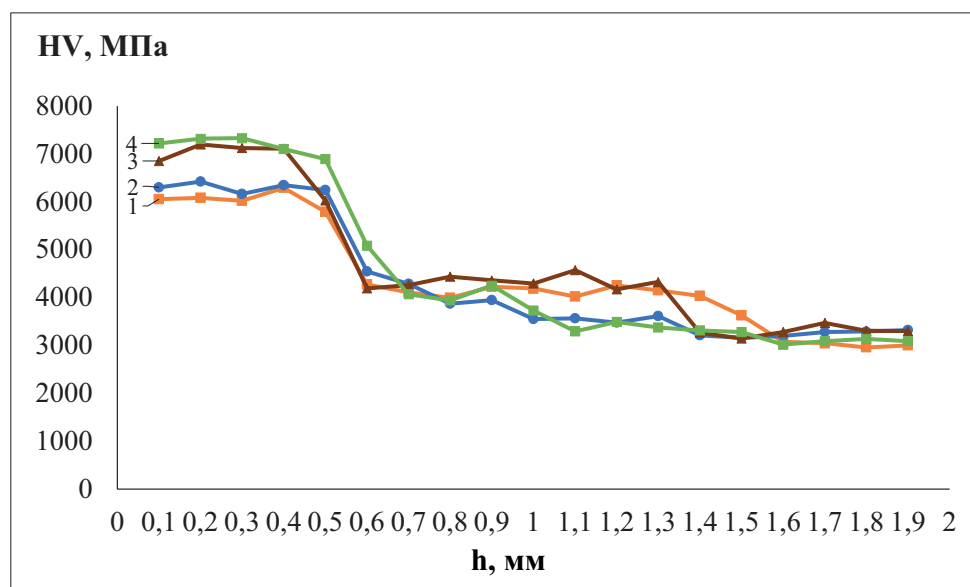


Рис. 3. Графики микротвердости единичных наплавленных валков: 1 — ПР-20Х13Н2; 2 — ПР-20Х13Н2 + 1 % нано-TaC; 3 — ПР-20Х13Н2 + 4 % нано-TaC; 4 — ПР-20Х13Н2 + 10 % нано-TaC

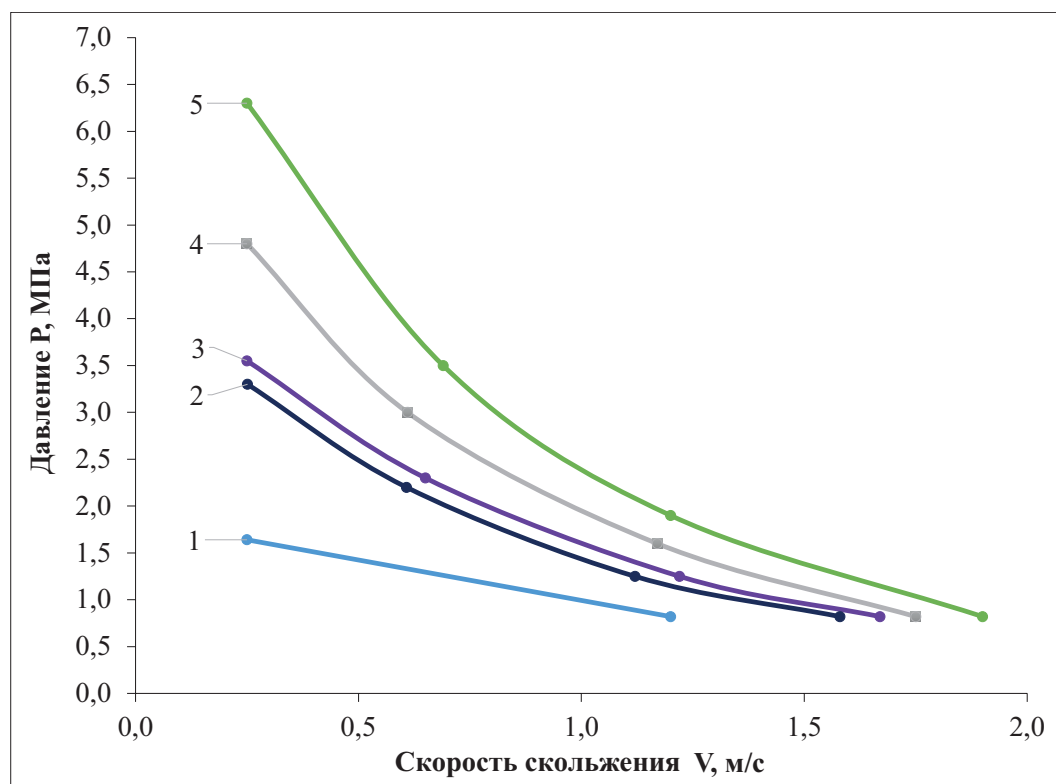


Рис. 4. Графики изменения давления заедания от скорости скольжения: 1 — сталь 38ХГТ; 2 — ПР-20Х13Н2; 3 — ПР-20Х13Н2 + 1 % нано-TaC; 4 — ПР-20Х13Н2 + 4 % нано-TaC; 5 — ПР-20Х13Н2 + 10 % нано-TaC

имели схожие промежуточные значения давления заедания от скорости скольжения, но были значительно выше, чем материала основы.

На рис. 5 представлены значения интенсивности изнашивания J-образцов с наплавкой порошка ПР-20Х13Н2 с добавлением 1, 4 и 10 мас.% нано-TaC в сравнении с исходной сталью. Минимальная интенсивность изнашивания была получена у образцов с наплавкой композиционным порошком ПР-20Х13Н2 + 10% нано-TaC, за ними по убыванию износостойкости следовали образцы с наплавкой ПР-20Х13Н2 + 4% нано-TaC, ПР-20Х13Н2 + 1% нано-TaC и ПР-20Х13Н2. Наихудшие результаты интенсивности изнашивания получены у образцов исходной стали 38ХГТ.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных работ разработана технология лазерной наплавки при поперечных колебаниях луча, обеспечивающая формирование наплавляемых дорожек с высотой и шириной 0,39–0,64 и 3,5–4,6 мм соответственно. Площадь поперечного сечения наплавленного валика была в 1,4–1,9 раза больше, чем при обработке де-

фокусированным пучком. Получено, что образцы с покрытием ПР-20Х13Н2 + 10% нано-TaC значительно превосходили по задиростойкости покрытие ПР-20Х13Н2 и материал основы. Испытания показали, что максимальная износостойкость покрытий достигается при использовании 10 мас.% наночастиц карбида тантала. Однако ввиду высокой стоимости использование более 10 мас.% данного материала становится экономически нецелесообразным. С учетом себестоимости процесса лазерной наплавки оптимальным решением является добавление в состав порошкового материала 4 мас.% наночастиц карбида тантала. Новая технология может найти свое применение при восстановлении шеек валов электрических машин, вагонов метрополитена и других деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации и требующих восстановления рабочих поверхностей.

Работа выполнена за счет средств государственного задания. Код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией): FFGU-2026-2003. Металлографические исследования выполнены на оборудовании ЦКП ИМАШ РАН.

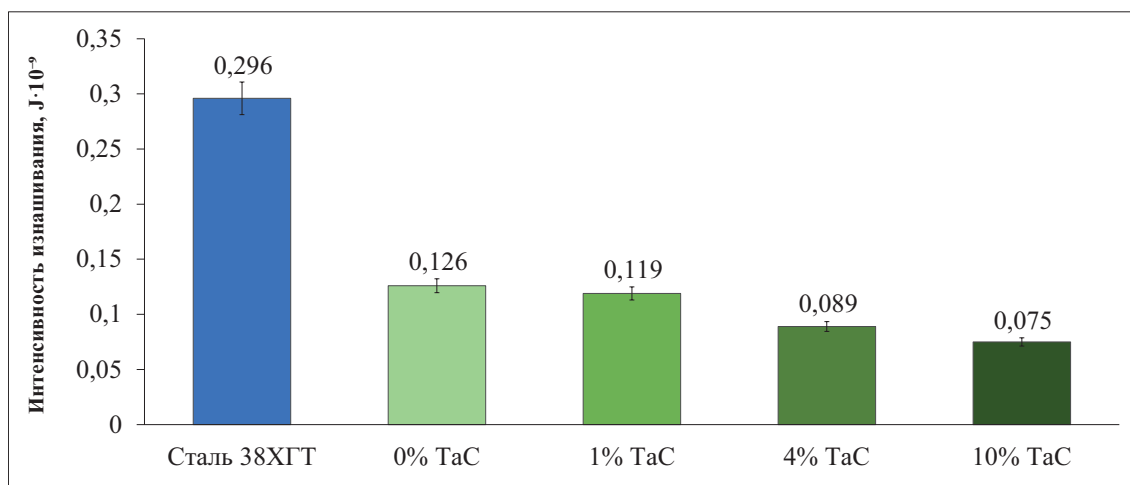


Рис. 5. Сводная диаграмма интенсивности изнашивания образцов с наплавкой в сравнении с исходной сталью

Список источников

1. The Effect of Multi-Element Alloying on the Structure and Properties of Laser Cladding Nickel-Based Coatings / S. Yan [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2023. Vol. 454. Art. № 129174.
2. Laser Cladding Technology for High Entropy Alloys: Effect and Applications / O. Prakash [et al.] // *Materials Research Express*. 2024. Vol. 11. Art. № 096510.
3. A Comparative Investigation on Microstructure Evolution and Wear Resistance of in Situ Synthesized NbC, WC, TaC Reinforced Mo_2FeB_2 Coatings by Laser Cladding / H. Zhang [et al.] // *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. Pp. 894–906.
4. Effect Of Ti on Ti50M Composite Coating Fabricated by Laser Cladding Technology / X. Jiao [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 325. Pp. 643–649.
5. Microstructure and Properties of Ta-Reinforced NbC + WC Composite Coating Deposited On 5Cr5MoSiV1 Steel Substrate by Laser Cladding / D. Hu [et al.] // *Optics and Laser Technology*. 2021. Vol. 142. Art. № 107210.
6. Tribological Properties and Sulfuric Acid Corrosion Resistance of Laser Clad CoCrFeNi High Entropy Alloy Coatings with Different Types of Ta Reinforcement / H. Wu [et al.] // *Tribology International*. 2023. Vol. 188. Art. № 10887.
7. Effects of Ta on Microstructure and Microhardness of Ni Based Laser Clad Coating / T. Yu [et al.] // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. Pp. 5098–5103.
8. Effects Of Ta/CeO₂ Addition on Microstructure and Wear Resistance of Ni-Based Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding on H13 Steel / H. Jinkang [et al.] 2019. Vol. 125. Art. № 390.
9. Influence of Ta on Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Laser Clad NiCrSiB Coating / T. Yu [et al.] // *Journal of Wuhan University of Technology*. 2013. Vol. 28. Pp. 437–443.
10. Enhanced Wear Resistance and New Insight into Microstructure Evolution of In-Situ (Ti, Nb)C Reinforced 316 L Stainless Steel Matrix Prepared Via Laser Cladding / M. Zhang [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. Vol. 128. Art. № 106043.
11. Microstructure and Properties of In-Situ Synthesized Ni₃Ta-TaC Reinforced Ni-Based Coatings by Laser Cladding / D. Hu [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 405. Art. № 126599.
12. Morphologies, Microstructures and Properties of TaC Particle Reinforced Inconel 625 Coatings Obtained by Laser Cladding with Wire / X. Xu [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 740. Pp. 16–27.
13. Li M., Huang K., Yi X. Crack Formation Mechanisms and Control Methods of Laser Cladding Coatings: A Review // *Coatings*. 2023. Vol. 13. Art. № 1117.
14. A Comparative Investigation on Microstructure Evolution and Wear Resistance of in Situ Synthesized NbC, WC, TaC Reinforced Mo_2FeB_2 Coatings by Laser Cladding / H. Zhang [et al.] // *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. Pp. 894–906.
15. Effect of a Small Addition of Ta on the Fe-Based Coating by Laser Cladding / W. Gao [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 291. Pp. 423–429.
16. Design and Development of Ta-Reinforced 410 Martensitic Stainless Steel Coatings Fabricated by Laser Cladding / H. Zhu [et al.] // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Pp. 12505–12513.
17. Бирюков В. П., Дозоров А. В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2006. № 1. С. 60–66.

Дата поступления: 24.06.2026

Решение о публикации: 27.07.2026

Контактная информация:

БИРЮКОВ Владимир Павлович — кандидат
техн. наук; laser-52@yandex.ru

ГОРЮНОВ Ярослав Алексеевич — аспирант;
yarosgorun22112000@gmail.com

Production of Wear-Resistant Coatings by Laser Cladding with Fe-Based Powder with the Addition of Ta Carbide Nanoparticles

V. P. Biryukov, Ya. A. Goryunov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4 Malyy Khariton'evskiy all., Moscow, 101990, Russia

For citation: Biryukov V. P., Goryunov Ya. A. Production of Wear-Resistant Coatings by Laser Cladding with Fe-Based Powder with the Addition of Ta Carbide Nanoparticles // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 842–850. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-842-850 (In Russian)

Abstract

Objective: the study is devoted to determining the optimal amount of tantalum carbide nanoparticles in the composition of a powder material to improve the mechanical and tribological characteristics of an Fe-based metal-ceramic coating obtained by laser cladding. **Methods:** laser cladding of the samples was performed using a round and oscillating spot at a energy density of 21–48 W s/mm². Metallographic analysis of the deposited coatings was performed using an MS-1000 optical system and an AM-419 digital microscope. Microhardness was determined using a PMT-3 device with an MS-8.3S digital camera at a load of 0.98 N. Tribological tests were performed on a friction machine with a vertical spindle rotation axis according to the following scheme: “flat rectangular coated sample — end surface of a counter-specimen made of grade 45 steel.” Friction moments and loading forces of the samples were measured using strain gauges in continuous mode, with data displayed on a personal computer monitor. A contactless inductive sensor was used to determine the spindle speed, with data output to a digital tachometer. **Results:** the study data revealed that metal-ceramic coatings containing 10 wt. % of tantalum carbide nanoparticles in the deposited charge exhibited short-term durability. However, the high cost makes the use of this powder material economically impractical. Therefore, given the cost of the laser cladding process itself, the generally accepted solution is additives containing up to 4 wt. % of tantalum carbide nanoparticles, which are slightly inferior to samples with higher tantalum carbide nanoparticle content. **Practical importance:** the developed technology can be used for cladding the shaft journals of electric machines in subway cars and other components requiring restoration of worn surfaces. It has been demonstrated that the wear resistance of the restored surface of electric machine shaft journals can be increased by adding tantalum carbide nanoparticles to the cladding material.

Keywords: laser cladding, surface restoration, wear resistance, microstructure, microhardness, wear rate, scuff resistance, electrical machines, nanoparticles, carbides, tantalum

References

1. Yan S., et al. The Effect of Multi-Element Alloying on the Structure and Properties of Laser Cladding Nickel-Based Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 454, art. no. 129174.
2. Prakash O., et al. Laser Cladding Technology for High Entropy Alloys: Effect and Applications, *Materials Research Express*, 2024, vol. 11, art. no. 096510.
3. Zhang H., et al. A Comparative Investigation on Microstructure Evolution and Wear Resistance of In Situ Synthesized NbC, WC, TaC Reinforced Mo₂FeB₂ Coatings by Laser Cladding, *Ceramics International*, 2023, vol. 49, pp. 894–906.
4. Jiao X., et al. Effect of Ti on T15M Composite Coating Fabricated by Laser Cladding Technology, *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 325, pp. 643–649.
5. Hu D., et al. Microstructure and Properties of Ta-Reinforced NiCuBSi + WC Composite Coating Deposited on 5Cr5MoSiV1 Steel Substrate by Laser

Cladding, *Optics and Laser Technology*, 2021, vol. 142, art. no. 107210.

6. Wu H., et al. Tribological Properties and Sulfuric Acid Corrosion Resistance of Laser Clad CoCrFeNi High Entropy Alloy Coatings with Different Types of TiC Reinforcement, *Tribology International*, 2023, vol. 188, art. no. 10887.

7. Yu T., et al. Effects of Ta on Microstructure and Microhardness of Ni-Based Laser Clad Coating, *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, pp. 5098–5103.

8. Jinkang H., et al. Effects of TiC/CeO₂ Addition on Microstructure and Wear Resistance of Ni-Based Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding on H13 Steel, 2019, vol. 125, art. no. 390.

9. Yu T., et al. Influence of Ta on Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Laser Clad NiCrSiB Coating, *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, vol. 28, pp. 437–443.

10. Zhang M., et al. Enhanced Wear Resistance and New Insight into Microstructure Evolution of In Situ (Ti, Nb)C Reinforced 316L Stainless Steel Matrix Prepared via Laser Cladding, *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 128, art. no. 106043.

11. Hu D., et al. Microstructure and Properties of In Situ Synthesized Ni₃Ta-TaC Reinforced Ni-Based Coatings by Laser Cladding, *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 405, art. no. 126599.

12. Xu X., et al. Morphologies, Microstructures and Properties of TiC Particle Reinforced Inconel 625 Coatings Obtained by Laser Cladding with Wire, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 740, pp. 16–27.

13. Li M., Huang K., Yi X. Crack Formation Mechanisms and Control Methods of Laser Cladding Coatings: A Review, *Coatings*, 2023, vol. 13, art. no. 1117.

14. Zhang H., et al. A Comparative Investigation on Microstructure Evolution and Wear Resistance of In Situ Synthesized NbC, WC, TaC Reinforced Mo₂FeB₂ Coatings by Laser Cladding, *Ceramics International*, 2023, vol. 49, pp. 894–906.

15. Gao W., et al. Effect of a Small Addition of Ti on the Fe-Based Coating by Laser Cladding, *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 291, pp. 423–429.

16. Zhu H., et al. Design and Development of TiC-Reinforced 410 Martensitic Stainless Steel Coatings Fabricated by Laser Cladding, *Ceramics International*, 2021, vol. 47, pp. 12505–12513.

17. Biryukov V. P., Dozorov A. V. Lazernye sistemy dlya uprochneniya, naplavki detaley i tochnogo raskroya listovogo materiala [Laser Systems for Hardening, Cladding of Parts and Precision Cutting of Sheet Material], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]*, 2006, no. 1, pp. 60–66. (In Russian)

Received: June 24, 2026

Accepted: July 27, 2026

Author's information:

Vladimir P. BIRYUKOV — PhD in Engineering;
laser-52@yandex.ru

Yaroslav A. GORYUNOV — Postgraduate Student;
yarosgorun22112000@gmail.com