

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

Петербургского университета
путей сообщения

Издается с 1884 г.



Том 23
ВЫПУСК 1
2026

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 23, выпуск 1, 2026

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

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
связи 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
«Книга-Сервис». Индекс подписки: 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

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

Евстафьев Андрей Михайлович, научный редак-
тор, 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 технологии, Тегеран, Иран

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

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

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

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

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

Казанская Лилия Фаатовна, д-р техн. наук, 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 транспортный
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 транспортный
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 25.03.2026. **Выход в свет:** 30.03.2026
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 14,88.
Тираж 200 экз. Заказ 1403/1. 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 6, 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

П И N Ф С 2-7499 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 "Kniga-
Service". 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, PhD Eng. Sci.,
Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University, St. Petersburg, Russia

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University, 2026.

СОДЕРЖАНИЕ



ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Н. Н. Илюхин Разработка программно-аппаратного комплекса поиска мест повреждения кабелей систем электроснабжения железнодорожного транспорта.....	7
С. В. Живушко, Е. А. Третьяков, О. В. Гателюк Оценка влияния факторов на электроосмотическую сушку увлажненной изоляции коллекторных тяговых электрических двигателей электровозов	17
А. А. Иванов, А. С. Шинкарук, И. А. Вишняков Вероятностный анализ отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта с использованием технологии цифрового двойника	27
М. А. Шрайбер Модель термомеханических напряжений в зоне «изоляция — проводник» тяговых электродвигателей локомотивов.....	41
П. Н. Мишуров, Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов Гибридная многокритериально-имитационная модель структурных элементов зеленых цепей поставок	50
А. Н. Сычугов Разработка цифровой модели электропоезда «Ласточка» для анализа тяговых и энергетических характеристик в программной среде SimInTech.....	62
А. А. Галков, И. А. Худоногов Интегральная модель для считывания и статистического анализа графиков нагрузки тягового подвижного состава	71
В. А. Смирнов, А. М. Семенов, С. О. Безбородов Решение задачи выбора мест размещения пунктов удаленного технического обслуживания маневровых локомотивов методом бинарной оптимизации	81
В. О. Иващенко, А. В. Шелагуров Анализ отказов тягового электрооборудования на скоростных электропоездах постоянного тока серии ЭС104 «Финист»	92
Н. Г. Кобозева, А. В. Новичихин Выбор подвижного состава для обеспечения государственных перевозок: постановка задачи и методы решения.....	101
Б. М. Лapidус, А. Т. Осьминин, И. И. Осьминина, Т. А. Малахова Проблема повышения скорости грузовых отправок	108
А. Ю. Антонов, Л. С. Блажко О необходимости учета типа грузовых вагонов при выборе вида статистического распределения вертикальных сил воздействия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0кН	117
В. Н. Смирнов, А. А. Голубев Работа эстакад высокоскоростных железнодорожных магистралей	126
Б. И. Ходак, В. П. Бельтюков Исследование зависимости затухания ультразвуковых колебаний в зависимости от температуры рельсовой стали	132

**ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

- О. А. Продоус, П. П. Якубчик, С. С. Балашов**
Совершенствование гидравлического расчета металлических водопроводов с использованием программного обеспечения «ГРИТ» 139
- К. В. Сливец, П. А. Кравченко**
Механизмы формирования бокового давления грунта в соответствии с упрощенной дискретной моделью песка 146
- Д. П. Голоскоков, А. В. Матросов**
Изгиб полубесконечной прямоугольной пластины: полиномиальное решение 154
- О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская**
Выбор технологии обработки осадка городских сточных вод 163
- Е. В. Опарина**
Динамический анализ захватного устройства робота-манипулятора 172
- М. Д. Вебер, А. В. Кузнецов**
К вопросу восстановления каменных бескосорных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 3 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями с припазовкой) 180
- Е. В. Мурузина, Ф. М. Ахметов, Л. Ф. Казанская**
Разработка способа изготовления модифицированного битум-полимерного вяжущего 190
- П. А. Пегин, А. А. Шульгин, А. В. Павловец**
Определение максимальных (опорных) моментов и их зависимости в статически неопределимых стержнях при отнулевом цикле изменения температуры 198
- Н. А. Волкова**
Анализ ледового режима реки Пур для определения продолжительности навигационного периода 209
- С. Л. Филиппов**
Искусственное воздействие на грунты с целью изменения их свойств на примере строительства Северомуйского тоннеля 221

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ**

- К. С. Простакевич, И. А. Сикарев, И. В. Юрин, Ю. В. Козлов, В. М. Абрамов**
Концептуализация развития инфокоммуникационных систем для водного транспорта с внешним экипажем в Арктике 229

CONTENTS



PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

N. N. Ilyukhin The hardware and software approach to identify damaged cables in railway power supply systems	7
S. V. Zhivushko, E. A. Tretiakov, O. V. Gatelyuk Assessment of factors influencing electroosmotic drying of moistened insulation in locomotive traction electric motors	17
A. A. Ivanov, A. S. Shinkaruk, I. A. Vishniakov A probability-based analysis of passenger car removal from operation for scheduled maintenance using digital twin modelling	27
M. A. Shrajber A model of thermal-mechanical stresses in the insulation-conductor zone of locomotive traction electric motors	41
P. N. Mishkurov, N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov A hybrid multi-criteria simulation model of green supply chain components	50
A. N. Sychugov Development of a "Lastochka" electric train digital model to analyze its traction and energy characteristics in the SimInTech environment	62
A. A. Galkov, I. A. Khudonogov An integral model for reading and statistical analysis of traction rolling stock load graphs.....	71
V. A. Smirnov, A. M. Semenov, S. O. Bezborodov Binary optimization method to choose locations for remote maintenance of shunting locomotives	81
V. O. Ivaschenko, A. V. Shelagurov Analysis of traction electrical equipment failures in ES104 "Finist" DC high-speed trains.....	92
N. G. Kobozeva, A. V. Novichikhin The choice of the rolling stock for public transportation: problem statement and solution approaches	101
B. M. Lapidus, A. T. Osminin, I. I. Osminina, T. A. Malakhova On the issue of increasing the speed of freight shipments	108
A. Yu. Antonov, L. S. Blazhko Accounting for the type of freight wagons in determining the statistical distribution of vertical track forces generated by rolling stock with axial loads of 230.5–245.0 kN	117
V. N. Smirnov, A. A. Golubev Response of high-speed railway viaducts to longitudinal seismic loading	126
B. I. Khodak, V. P. Beltiukov An investigation into the thermal dependency of ultrasonic vibration attenuation in steel rail	132

**GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**

A. Prodous, P. P. Yakubchik, C. C Balashov Enhancement of hydraulic calculations for metallic water pipelines within the GRIT software the "GRIT" software.....	139
K. V. Slivetz, P. A. Kravchenko Mechanisms for generating lateral earth pressure at rest based on a simplified discrete sand model.....	146
D. P. Goloskokov, A. V. Matrosov A polynomial solution for bending a semi-infinite rectangular plate	154
O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya Methods for urban wastewater sludge treatment.....	163
E. V. Oparina Dynamic analysis of a robotic manipulator gripper.....	172
M. D. Veber, A. V. Kuznetsov Reconstruction of cantilever stone staircases in the architecture of St. Petersburg. Part 3: how to calculate a straight flight staircase with plane treads	180
E. V. Muruzina, F. M. Akhmetov, L. F. Kazanskaya Development of a method for producing a modified bitumen-polymer binder.....	190
P. A. Pegin, A. A. Shulgin, A. V. Pavlovets Determination of maximum support moments and their dependences in statically indeterminate rods subjected to a zero-cycle temperature change	198
N. A. Volkova Assessing the Pur River freeze-thaw cycles to determine the length of its navigation season	209
S. L. Filippov Improvement of soil properties in tunnel construction, as demonstrated by the Severomuya Tunnel construction.....	221

**HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT**

K. S. Prostakevich, I.A. Sikarev, I.V. Yurin, Yu. V. Kozlov, V.M. Abramov Conceptualization of information and communication system development for remotely operated maritime transport in Arctic region.....	229
---	-----



УДК 621.315.2

Разработка программно-аппаратного комплекса поиска мест повреждения кабелей систем электроснабжения железнодорожного транспорта

Н. Н. Илюхин

Омский государственный университет путей сообщения, Россия, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

Для цитирования: *Илюхин Н. Н.* Разработка программно-аппаратного комплекса поиска мест повреждения кабелей систем электроснабжения железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-7-16

Аннотация

Цель: реализовать метод диагностирования кабелей электроснабжения путем повышения точности определения составляющих электромагнитного поля на поверхности земли от тока в кабеле. Разработать структурную схему устройства; создать макетный образец устройства; провести испытания в лабораторных условиях; доработать образец устройства после испытаний. **Методы:** методология проведения работ включает в себя разработку структурной схемы, электрической принципиальной схемы, создание макета микропроцессорного устройства с комплексом алгоритмов и программ, лабораторные испытания полученного образца и получение метрологических характеристик. **Результаты:** выполнено проектирование электрической схемы и печатной платы; создан макетный образец прибора; разработано для него программное обеспечение; проведены лабораторные испытания, направленные на проверку его основных функций, в частности, определены метрологические характеристики прибора, от которых зависит эффективность применения разрабатываемого и исследуемого фазового метода. **Практическая значимость:** решается задача усовершенствования аппаратуры поиска мест повреждений кабеля с металлическими покровами на основе нового фазового метода за счет синхронизации генератора и приемника с использованием спутниковой системы ГЛОНАСС. Фазовый метод предоставляет возможность определить место повреждения кабеля с высокой точностью за счет резкого изменения фазы напряженности магнитного поля в окрестности повреждения кабеля, находящегося на глубине до нескольких метров. В результате проведенных работ получены результаты, подтверждающие возможность применения устройства для использования фазового метода диагностирования кабелей систем электроснабжения. Новизна заключается в применении нового фазового метода для решения задачи диагностирования, который позволяет работать в условиях сильных электромагнитных помех.

Ключевые слова: прибор, контроль повреждения изоляции кабеля, программное обеспечение, лабораторные испытания, фазовый метод

Согласно Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, повышение уровня безопасности функционирования железных дорог является важнейшим государственным приоритетом развития и модернизации отрасли, научных исследований и текущей эксплуатационной ра-

боты. Безопасность железнодорожного транспорта зависит от надежности работы системы электроснабжения, одним из основных элементов которой являются кабельные линии электроснабжения [1–3].

В настоящее время на сети железных дорог для поиска мест повреждения кабеля

применяются рефлектометры ИРК-ПРО, РИ-10М1, «Сова» и др. [4–6]. Рефлектометры относятся к дистанционным методам поиска повреждения кабеля. Дистанционные методы позволяют из доступной кабелю точки, то есть точки подключения аппаратуры поиска, определить район повреждения. Данные методы позволяют установить место повреждения с погрешностью 2–3 %. При длине кабеля несколько километров погрешность будет исчисляться десятками метров.

Поэтому для получения окончательного результата, то есть устранения повреждения кабеля, необходимо выполнить большой объем земляных работ, что затруднено, если кабель расположен под покрытием или работы необходимо выполнять в холодное время года. Когда грунт находится в мерзлом состоянии, затраты возрастают в несколько раз. Таким образом, главный недостаток таких методов — это значительные временные и трудовые затраты.

Поэтому после определения района повреждения с помощью рефлектометра используются трассовые методы, основанные на регистрации составляющих электромагнитного поля на поверхности земли от тока в кабеле. При этом чаще используются бесконтактные методы. В них используется эффект резкого изменения амплитуды или фазы напряженности магнитного поля от измерительного тока кабеля в месте повреждения.

Применяемые в настоящее время на сети железных дорог трассоискатели Ridgid SeekTech SR-20 (США), «Успех» АГ-428.20Н (РФ), «Сталкер», «Поиск» и др. [7–10] используют в качестве испытательного сигнала, подаваемого в кабель, синусоидальный или импульсный на различных частотах. При этом основная проблема применения таких приборов на сети ОАО «РЖД» — это влияние на них мощных электромагнитных помех, создаваемых элек-

трифицированным железнодорожным транспортом. Причем эти помехи имеют не только значительные амплитуды, но и сложный гармонический состав. Таким образом, аппаратура, которая отлично работает в других условиях, снижает заявленную производителем точность или становится абсолютно бесполезной для поиска повреждения кабеля, проложенного вблизи электрифицированной железной дороги. Использование просто полосовых фильтров также не является эффективным решением, поскольку, во-первых, обеспечить в условиях сложного спектрального состава необходимую крутизну их амплитудно-частотной характеристики достаточно сложно при применении пассивных компонентов; во-вторых, при применении активных компонентов амплитуда помехи загоняет транзисторы в насыщение, и фильтр перестает работать.

Таким образом, существующие средства не позволяют с достаточной точностью определять места повреждения изоляции и трассу кабелей электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей в условиях функционирования электрифицированного железнодорожного транспорта, поэтому задача совершенствования методов и разработки помехозащищенной аппаратуры поиска мест повреждения кабеля актуальна.

Задача совершенствования аппаратуры поиска мест повреждений кабеля с металлическими покровами решается на основе нового фазового метода за счет синхронизации генератора и приемника с использованием спутниковой системы ГЛОНАСС. Фазовый метод предоставляет возможность определить место повреждения кабеля с высокой точностью за счет резкого изменения фазы напряженности магнитного поля в окрестности повреждения кабеля, находящегося на глубине до нескольких метров.

Для реализации фазового метода с помощью цифровых устройств разработан программно-аппаратный комплекс (устройство), который осуществляет измерение напряженности магнитного поля с помощью подключенного датчика с индукционным принципом или другим типом магнетометра и сравнение начальной фазы измеренного сигнала с начальной фазой удаленного генератора, подключенного к диагностируемой линии. Для точной синхронизации необходимы опорный импульсный сигнал, получаемый со спутниковой системы ГЛОНАСС, и взаимодействие с удаленным генератором по низкоскоростной радиолинии малой мощности. Вспомогательными функциями прибора являются операции нормализации и преобразования сигнала: деление или усиление, фильтрация от гармоник промышленной частоты, усиление до динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя, преобразование сигнала в цифровой вид. В цифровом устройстве реализованы функции цифровой обработки сигнала, сохранения информации на носитель данных, взаимодействие с компьютером, функции ввода-вывода.

Структурная схема разрабатываемого устройства определения места повреждения изоляции кабеля и дополнительные компоненты, необходимые для проведения его лабораторных испытаний, показаны на рис. 1.

Разрабатываемое устройство показано в нижней части приведенной схемы и включает в себя следующие компоненты:

- систему питания, включая аккумуляторные батареи с устройством контроля заряда и подсистему питания со стабилизацией необходимых уровней напряжения;
- основной измерительный канал преобразования сигнала, снимаемого с датчика магнитного поля (канал должен состоять из опционально предусмотренного аналогово-

го пассивного фильтра, делителя/усилителя напряжения и буфера, активного фильтра, усилителя с программируемым коэффициентом и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), при этом комплектность перечисленных устройств может впоследствии изменяться в зависимости от результатов лабораторных и полевых испытаний);

- вспомогательный канал, выполненный аналогично основному, который при проведении лабораторных испытаний будет использоваться для подключения опорного сигнала, а при полевых испытаниях и при последующей эксплуатации может быть использован для подключения второго датчика магнитного поля, разнесенного по высоте с основным датчиком для определения глубины диагностируемой линии;

- микроконтроллерное устройство, выполняющее цифровую обработку сигналов с целью детектирования фазового сдвига между ними, а также другие функции программного обеспечения;

- периферийные устройства, подключаемые к микроконтроллеру (клавиатура, дисплей, интерфейс USB для соединения с компьютером, интерфейс подключения карты памяти SD);

- модуль GPS/ГЛОНАСС;

- опционально подключаемый модуль радиосвязи для обеспечения беспроводной передачи данных (например, работающий по технологии LoRa).

В число вспомогательных компонентов для проведения лабораторных испытаний входят:

- лабораторный генератор сигналов, который впоследствии будет заменяться на переносной генератор;
- макет диагностируемой линии, который в лабораторных испытаниях заменяется фазовращателем.

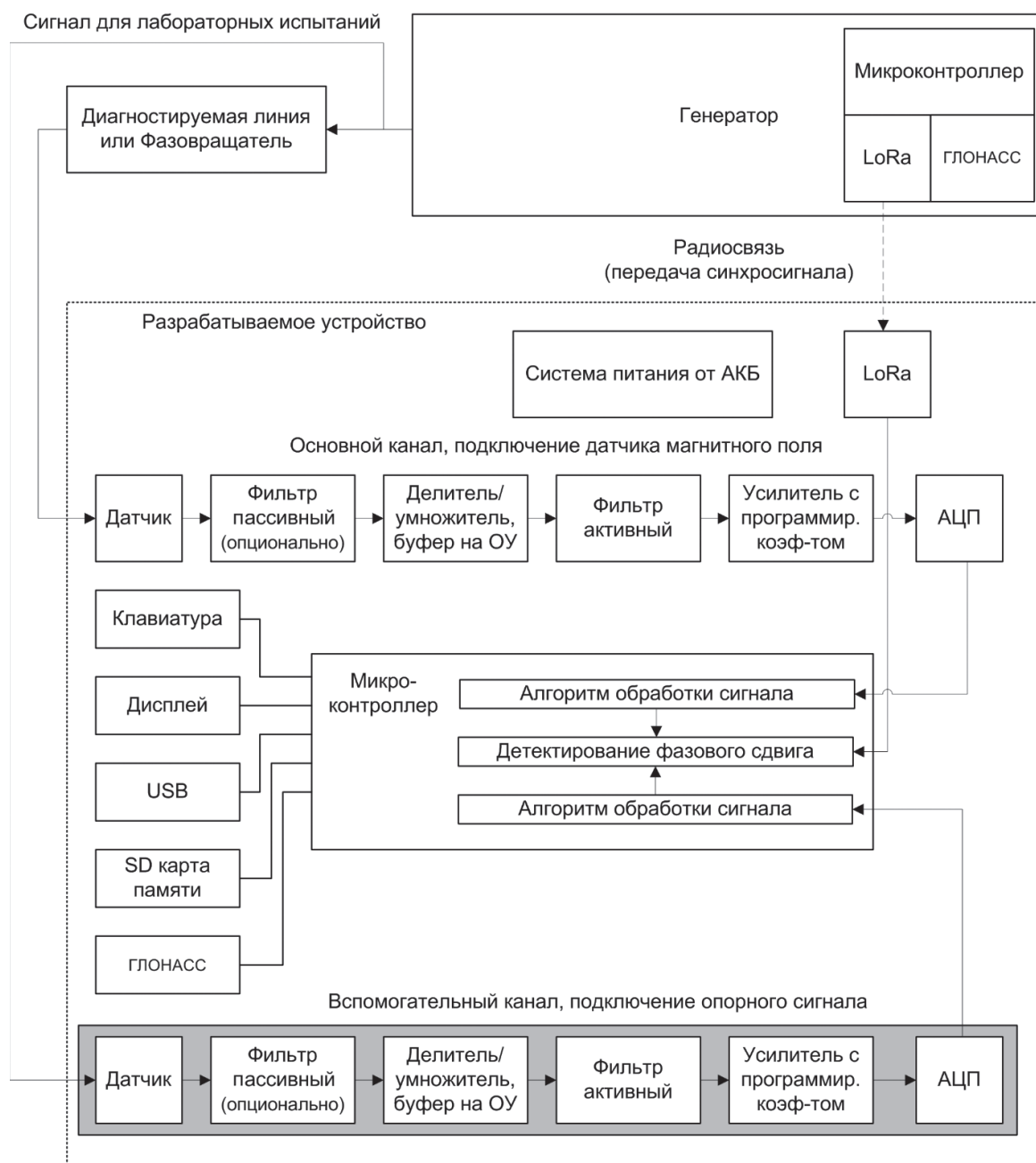


Рис. 1. Структурная схема устройства и компоненты для лабораторных испытаний

Генератор, который может использоваться совместно с разрабатываемым устройством, должен включать в себя микропроцессорный модуль, беспроводной модуль (например, LoRa) и приемник GPS/ГЛОНАСС. Это позволит определять начальную фазу генерируемого сигнала относительно точного миро-

вого времени, передавать это значение в виде информационного сообщения с генератора на разрабатываемое устройство.

При проведении лабораторных испытаний для проверки принципиальной работоспособности устройства может применяться непосредственная передача сигнала с генератора

на вход вспомогательного измерительного канала.

На основе электрической принципиальной схемы разработана печатная плата для лабораторного образца устройства. При создании печатной платы принимались во внимание корпуса микросхем и дискретных элементов. Большинство резисторов и конденсаторов для удобства ручного монтажа, но также и для сохранения достаточной компактности опытного образца изделия (так, чтобы при необходимости можно было выполнить тиражирование и последующую эксплуатацию) имеют корпус SMD 1206 или SMD 0805. Печатная плата имеет четыре электрических слоя, где выполнена соответствующая трассировка схемы. Трехмерная модель печатной платы показана на рис. 2 и 3 (с лицевой и обратной сторон).

Разработано программное обеспечение для микроконтроллера, основные компоненты которого показаны на рис. 4. После всех инициализаций начинают работать основные задачи, часть из которых имеют наивысший приоритет и выполняются в реальном времени (получение отсчетов сигнала). Следующий приоритет

имеют задачи цифровой обработки и обмена по интерфейсам с внешними устройствами. Механизм управления задачами — по прерываниям таймеров и по отложенным внешним прерываниям.

Проведены испытания в лабораторных условиях. Для этого с помощью цифрового генератора Rigol DG4102 задавались два синхронных сигнала, имеющие гармонику с частотой 35 Гц. Задавались различные амплитуды сигналов, их начальные фазы (относительный фазовый сдвиг) и различные постоянные составляющие. Такая модель имитирует сигнал, который создается генератором, подключенным к диагностируемой линии, и сигнал, измеренный посредством индукционного датчика, который измеряет наведенное поле в месте поиска повреждения кабеля.

Примерный вид спектра сигнала, который был снят в лабораторных условиях при следующих заданных параметрах: частота 35 Гц, амплитуда 40 мВ, постоянная составляющая 75 мВ, показан на рис. 5. Спектр получен непосредственно из памяти микроконтроллера посредством отладочных средств. Как видно, на

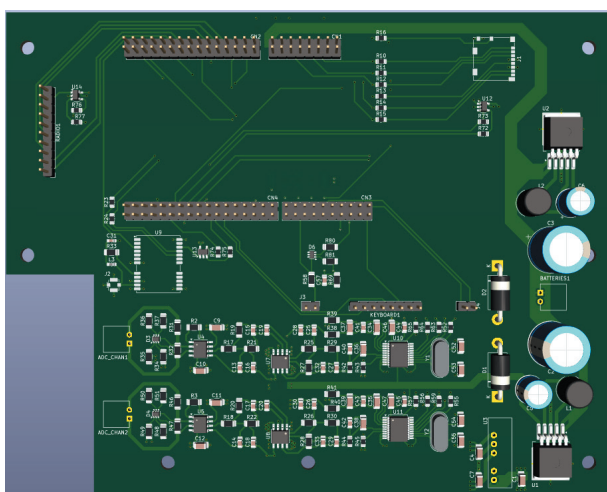


Рис. 2. Лицевая сторона печатной платы (модель)

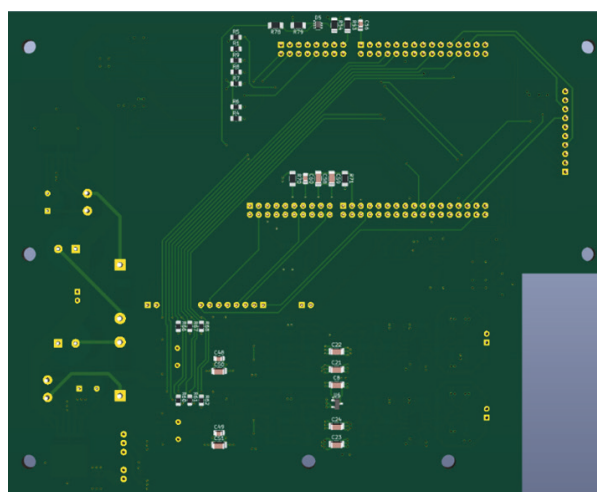


Рис. 3. Обратная сторона печатной платы (модель)

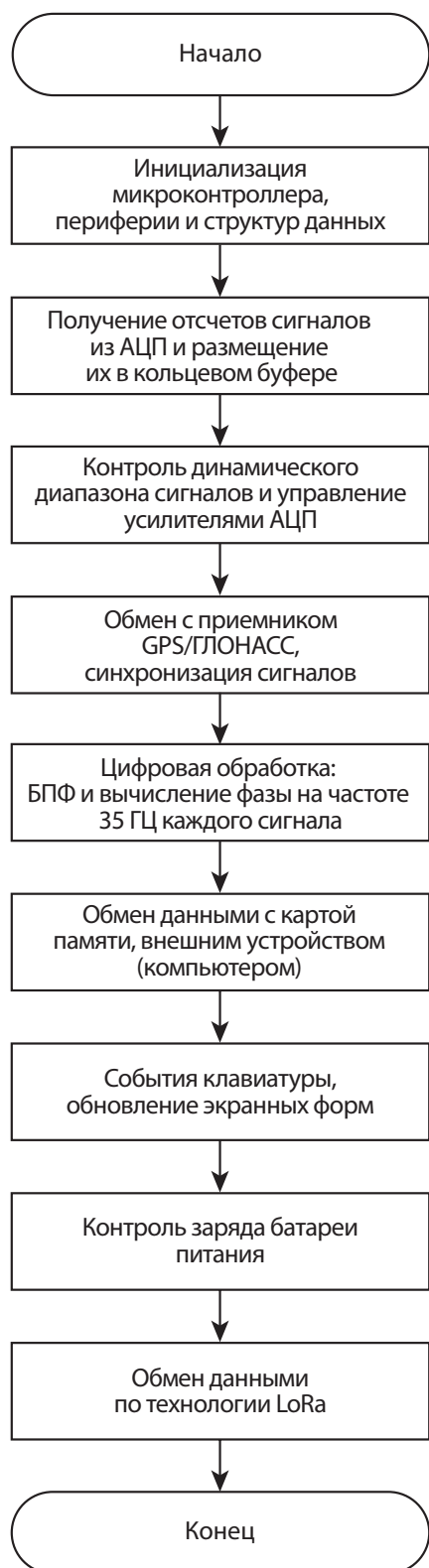


Рис. 4. Основные компоненты программы для микроконтроллера

частоте 35 Гц имеется максимум, в этой точке вычисляется значение аргумента (абсолютная фаза гармоники).

Первая серия измерений была выполнена при фиксированной амплитуде двух сигналов 30 и 100 мВ соответственно и различных фазовых сдвигах.

Абсолютная погрешность измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов рассчитывалась по формуле:

$$\Delta\varphi_i - \varphi_0, \quad (1)$$

где φ_i — измеренный с помощью устройства фазовый сдвиг между опорным и диагностирующим сигналами, град.;

φ_0 — заданный фазовый сдвиг между опорным и диагностирующим сигналами, град.

Среднеквадратическое отклонение измеренных значений от их среднего значения определялось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}, \quad (2)$$

где φ_i — измеренный с помощью устройства фазовый сдвиг между опорным и диагностирующим сигналами, град.;

$\bar{\varphi}$ — среднеарифметическое значение результатов фазового сдвига для n параллельных измерений, град.;

n — количество параллельных измерений.

При каждом значении фазового сдвига измерения выполнялись в течение 20 с для сбора статистики, по которой определялись измеренная разность фаз и среднеквадратическое отклонение измеренных значений от их среднего значения. В результате были найдены значения абсолютной погрешности измерения разности фаз. Результаты приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что при любых возможных фазовых сдвигах между опорным и диагностирующим сигналами абсолютная погрешность имеет значение в пределах 1° (она



Рис. 5. Амплитудный спектр измеренного сигнала с максимумом на частоте 35 Гц

ТАБЛИЦА 1. Измерения при различных фазовых сдвигах

Заданная разность фаз, градусы	Измеренная разность фаз, градусы	Среднеквадратическое отклонение результата, градусы	Абсолютная погрешность измерения, градусы
0	-1,0	0,21	1,0
5	4,1	0,33	0,9
10	9,0	0,22	1,0
15	14,1	0,22	0,9
20	19,2	0,23	0,8
25	24,2	0,15	0,8
30	29,1	0,11	0,9
35	34,2	0,23	0,8
40	39,5	0,17	0,5
45	44,3	0,08	0,7
50	49,2	0,07	0,8
55	54,4	0,08	0,6
60	59,1	0,04	0,9
65	64,2	0,05	0,8
70	69,3	0,06	0,7
75	74,3	0,15	0,7
80	79,3	0,10	0,7
85	84,2	0,12	0,8
90	89,1	0,06	0,9

имеет всегда положительный знак, следовательно, имеет место систематический фактор, который можно будет попытаться устранить),

а малое среднеквадратическое отклонение результата измерения свидетельствует о хорошей повторяемости. Можно считать, что

абсолютная погрешность измерения разности фаз не зависит от значения разности фаз.

Следующая серия измерений была выполнена при различных амплитудах первого и второго сигналов и заданном фазовом сдвиге между ними, равном 30° . Результаты приведены в табл. 2.

Абсолютная погрешность измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов рассчитывалась по формуле (1). Абсолютные погрешности, полученные по этим результатам, приведены в табл. 3.

По итогам эксперимента получено, что значения абсолютных погрешностей не превышают 2° . Ошибка всегда имеет один знак, что говорит о наличии систематической погрешности.

Для проверки того, что устройство будет успешно обрабатывать сигнал, в котором присутствуют помехи, кратные 50 Гц (высшие гармоники), причем превышающие по амплитуде диагностирующую частоту 35 Гц, был

проведен эксперимент с полигармоническим сигналом. Первый сигнал имел, кроме основной частоты 35 Гц, дополнительные кратные гармоники: 3, 5 и 7, имеющие большее значение амплитуды. Второй сигнал имел в своем составе 2, 4 и 6 гармоники.

Данный эксперимент также показал эффективное определение разности фаз требуемой гармоники 35 Гц. При заданной генератором разности фаз 30° измеренная составила $29,2^\circ$. При заданной разности фаз 60° измеренная составила $58,5^\circ$. Абсолютные погрешности, соответственно, равны $0,8^\circ$ и $1,5^\circ$, что также находится в пределах 2° . Таким образом, наличие высших гармоник не оказывает существенного влияния на точность получаемого результата, что позволит использовать устройство при наличии помех промышленной частоты и кратных частот.

Результаты испытаний показали, что существенная доработка устройства не требуется. Дополнительное повышение точности было выпол-

ТАБЛИЦА 2. Измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов, градусы

Амплитуда измеренного сигнала, мВ	Амплитуда опорного сигнала, мВ					
	2	4	10	30	100	300
2	29,4	29,2	29,1	29,0	29,4	29,5
4	29,0	29,4	29,2	29,0	29,6	29,5
10	29,0	28,8	28,7	28,8	28,9	29,4
30	29,3	28,5	28,9	28,4	28,9	29,4
100	29,4	28,7	28,6	28,3	28,9	28,9
300	27,9	28,1	28,5	28,1	28,2	28,4

ТАБЛИЦА 3. Абсолютная погрешность измерения фазового сдвига при различных амплитудах сигналов, градусы

Амплитуда измеренного сигнала, мВ	Амплитуда опорного сигнала, мВ					
	2	4	10	30	100	300
2	0,6	0,8	0,9	1,0	0,6	0,5
4	1,0	0,6	0,8	1,0	0,4	0,5
10	1,0	1,2	1,3	1,2	1,1	0,6
30	0,7	1,5	1,1	1,6	1,1	0,6
100	0,6	1,3	1,4	1,7	1,1	1,1
300	2,1	1,9	1,5	1,9	1,8	1,6

нено путем добавления поправки к измерению фазового сдвига, которая была принята равной 1° .

Выводы

Выполнены проектирование и разработка устройства, выполняющего функцию приемной и обрабатывающей части программно-аппаратного комплекса для определения места повреждения изоляции кабеля фазовым методом. Устройство выполняет измерение сигнала с помощью индукционного датчика, при этом сигнал преобразуется в аналоговом тракте, дискретизируется и сравнивается методами цифровой обработки по фазе с опорным сигналом, сформированным генератором, подключенным к диагностируемому кабелю.

Разработанное устройство в виде лабораторного образца прошло испытания при различных параметрах сигнала: с разным значением амплитуды, сдвига фаз между опорным и диагностирующим сигналами, при наличии в сигнале шумов и высокочастотных гармонических помех. По итогам испытаний выполнены незначительные доработки. Устройство позволяет определять фазовый сдвиг с точностью порядка 1° , что вполне достаточно для уверенного применения метода.

Список источников

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 310 с.

2. Дементьев В.С. Как определить место повреждения в силовом кабеле. М.: Энергия, 1966. 54 с.

3. Елизарова Ю.М. Совершенствование методов и аппаратных средств поиска мест повреждения кабелей электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей: дисс. ... канд. техн. наук / Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2009. 156 с.

4. ИРК-ПРО. Инструкция по эксплуатации прибора.

5. РИ-10М1. Инструкция по эксплуатации прибора.

6. «Сова». Инструкция по эксплуатации прибора.

7. Ridgid SeekTech SR-20. Инструкция по эксплуатации прибора.

8. «Успех АГ-428.20Н». Инструкция по эксплуатации прибора.

9. Илюхин Н.Н., Кузовкин А.С. Сравнительная характеристика устройств, используемых для идентификации мест повреждения кабельных линий // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки. Омск, 2024. С. 168–173.

10. «Поиск». Инструкция по эксплуатации прибора.

Дата поступления: 21.10.2025

Решение о публикации: 12.01.2026

Контактная информация:

ИЛЮХИН Никита Николаевич — аспирант;
nekit-exe@mail.ru

The hardware and software approach to identify damaged cables in railway power supply systems

N. N. Ilyukhin

Omsk State University of Railway Transport, 35 Marx pr., Omsk, 644046, Russia

For citation: *Ilyukhin N. N.* The hardware and software approach to identify damaged cables in railway power supply systems // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-7-16. (In Russian)

Abstract

Objective: to implement a diagnostic method for power-supply cables by improving the accuracy of detecting the electromagnetic field components on the ground surface generated by cable currents. The project tasks included developing the device schematic, creating a prototype, conducting laboratory tests, and refining the prototype based on the test outcomes. **Methods:** the approach involved creating a structural diagram and electrical schematic, developing of a microprocessor-based prototype incorporating multiple algorithms and associated software, conducting laboratory experiments on the prototype, and assessing its metrological characteristics. **Results:** an electrical schematic and printed circuit board were developed; a prototype device was constructed and the accompanying software implemented; laboratory tests validated the device's primary functions, in particular and qualified its metrological characteristics, which are critical to the effectiveness of the phase-based method under development depends. **Practical significance:** this research advances equipment for detecting faults in cables with metallic sheaths by synchronizing the signal generator and receiver via the GLONASS satellite system. The proposed phase-based method enables accurate localization of cable faults by abrupt perturbations in the magnetic field associated with discontinuities in buried cables at depths of several meters. Experimental studies corroborate the device's applicability for implementing the phase-based diagnostic technique on power-supply system cables. The novelty lies in the introduction of a phase-based method that maintains reliable fault detection performance even in environments with substantial electromagnetic interference.

Keywords: device, cable insulation breakdown monitoring, software, laboratory testing, phase-based method

References

1. Shalyt G.M. Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh. M.: Energoizdat, 1982. 309 s. (In Russian)
2. Dement'ev B.C. Kak opredelit' mesto povrezhdeniya v silovom kabele. M.: Energiya, 1966. 54 s. (In Russian)
3. Elizarova Yu.M. Covershenstvovanie metodov i apparatnykh sredstv poiska mest povrezhdeniya kabelej elektrosnabzheniya netyagovykh zheleznodorozhnykh potrebitelej: diss. ... kand. tekhn. nauk / Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. Omsk, 2009. 156 s. (In Russian)
4. IRK-PRO. Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
5. RI-10M1. Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
6. "Sova". Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
7. Ridgid SeekTech SR-20. Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
8. "Uspekh AG-428.20N". Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)
9. Ilyukhin N.N., Kuzovkin A.S. Sravnitel'naya kharakteristika ustrojstv, ispol'zuemykh dlya identifikatsii mest povrezhdeniya kabel'nykh linij // Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoj konferentsii, posvyashchennoj Dnyu rossijskoj nauki. Omsk, 2024. S. 168–173. (In Russian)
10. "Poisk". Instruktsiya po ekspluatatsii pribora. (In Russian)

Received: 21.10.2025

Accepted: 12.01.2026

Author's information:

Nikita N. ILYUKHIN — Postgraduate Student;
nekit-exe@mail.ru

УДК 621.3.048

Оценка влияния факторов на электроосмотическую сушку увлажненной изоляции коллекторных тяговых электрических двигателей электровозов

С. В. Живушко, Е. А. Третьяков, О. В. Гателюк

Омский государственный университет путей сообщения, Россия, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

Для цитирования: Живушко С. В., Третьяков Е. А., Гателюк О. В. Оценка влияния факторов на электроосмотическую сушку увлажненной изоляции коллекторных тяговых электрических двигателей электровозов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 17–26. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-17-26

Аннотация

Цель: определить влияние воздействующих факторов на скорость электроосмотической сушки увлажненной изоляции обмоток тягового электрического двигателя постоянного тока. **Методы:** экспериментальный. Обработка результатов эксперимента осуществлялась методами математической статистики. **Результаты:** проведены две серии экспериментов электроосмотической сушки увлажненной изоляции тягового электрического двигателя постоянного тока при различных значениях факторов напряжения и емкости С-фильтра. Получена выборка из 60 значений сопротивлений изоляции главных полюсов ТЭД (по 30 в каждой серии). Проведен регрессионный анализ результатов. Величина достоверности аппроксимации составила 0,996 по напряжению и 0,804 по емкости С-фильтра. Подтверждена однородность экспериментальных данных критерием Вилкоксона. Проведен двухфакторный дисперсионный анализ для связанных выборок. Результат: факторы напряжения и емкости С-фильтра по отдельности оказывают значительное влияние на скорость электроосмотической сушки. Факторы индивидуального различия и различия выборок оказались незначимыми. Увеличение напряжения электроосмотической сушки от 500 до 2500 В повышает сопротивление изоляции главных полюсов в квадратичной зависимости на 210%, а уменьшение коэффициента пульсаций от 0,2 до 0,04 снижает сопротивление изоляции на 45%. **Практическая значимость:** полученные данные могут использоваться для разработки технологии электроосмотической сушки ТЭД в условиях сервисного депо в период отрицательных температур.

Ключевые слова: подвижной состав, тяговый электрический двигатель, обмотка, изоляция, увлажнение, сушка, электроосмос, регрессионный анализ, ранговый метод, критерий Вилкоксона, двухфакторный дисперсионный анализ, несвязанная выборка

Введение

Изоляционные материалы тяговых электродвигателей взаимодействуют с окружающей средой, что при определенных условиях приводит к их увлажнению. Влага из окружающей среды попадает на поверхность и внутрь многослойного изоляционного материала и путем диффузии распространяется внутри структуры [1]. Для тяговых электрических двигателей

(ТЭД) проблема увлажнения изоляции обмоток является актуальной. В период отрицательной температуры окружающей среды при снижении температуры нагретых ТЭД происходят конденсация воздуха и образование водяной пленки на поверхности изоляции обмоток, что приводит к снижению сопротивления изоляции и ухудшению коэффициента абсорбции. Указанные процессы могут происходить во

время движения поезда, стоянки в ожидании работы, а также при установке на ремонтные стойла для сервисного обслуживания.

На рис. 1 представлен пример снижения сопротивления изоляции ТЭД 3-4 ниже допустимого значения на электровозе 2ЭС6 при эксплуатации в декабре 2024 года.

Для повышения сопротивления изоляции в условиях сервисного обслуживания в период отрицательных температур применяют калориферные стационарные или передвижные установки, токовую сушку [2, 3]. Указанные методы сушки требуют значительных затрат времени и электрической энергии.

В статье [4] авторы предлагают рациональное использование электрической энергии за счет применения широтно-импульсного регулирования подачи горячего воздуха в полость ТЭД. При этом обмотки подвергаются нагреву, который приводит к негативным последствиям для изоляции, образуются микротрещины.

В работах [5, 6] предлагается электроосмотический способ проведения сушки (ЭОС) асинхронных электрических машин без нагрева изоляции при напряжении 350–650 В.

Способ тестировался на изоляции трехфазных асинхронных двигателей напряжением 380 В, используемых в сельском хозяйстве.

В ходе проведенных авторами экспериментов по оценке эффективности ЭОС коллекторных ТЭД 810-й серии в условиях сервисного локомотивного депо между обмотками и корпусом прикладывалось пульсирующее напряжение величиной 1500–2500 В [7, 8]. В результате исследований показано, что электроосмотическая сушка совместно с калориферной приводит к повышению эффективности процесса путем уменьшения времени восстановления сопротивления увлажненной изоляции обмоток ТЭД до заданного значения более чем в два раза. При этом не выполнялась оценка влияния степени сглаживания пульсирующего напряжения и амплитуды напряжения (далее — факторы) на эффективность ЭОС.

Настоящее исследование посвящено оценке влияния уровня напряжения, а также степени сглаживания переменной составляющей пульсирующего напряжения на интенсивность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД.

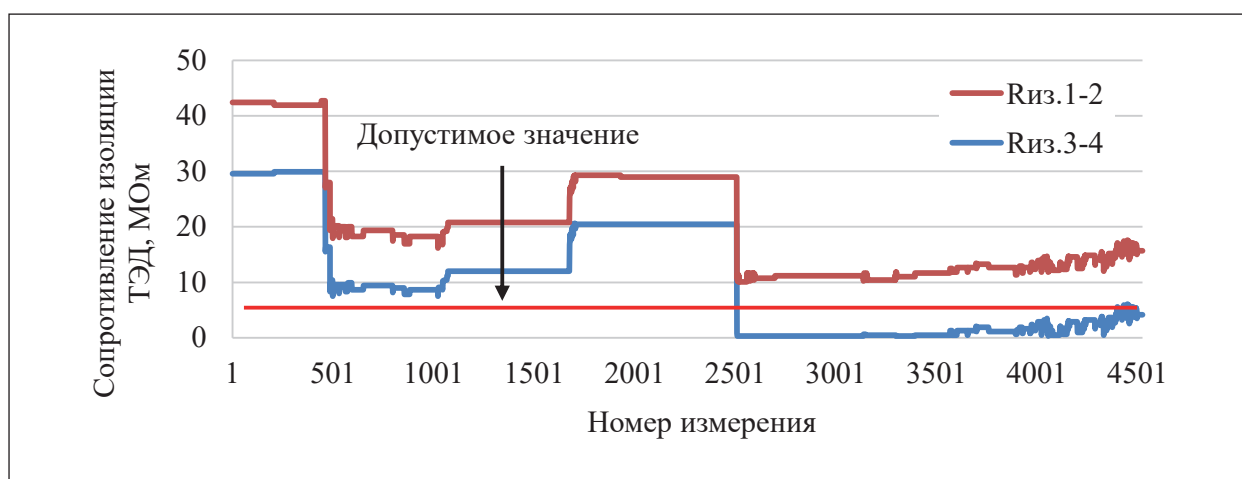


Рис. 1. Сопротивление изоляции обмоток ТЭД 1-2 и ТЭД 3-4 во время поездки 2ЭС6 №358 (показания сняты с регистратора параметров электровоза 17 декабря 2024 года)

Основная часть

Цель исследования — определить влияние рассматриваемых факторов на скорость ЭОС увлажненной изоляции обмоток ТЭД постоянного тока.

Использовался экспериментальный метод. Обработка результатов эксперимента осуществлялась методами математической статистики.

Объект исследования — изоляция главных полюсов (ГП) ТЭД 810-й серии электровоза 2ЭС6.

Материалы и методы

Интенсивность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД определялась по величине конечного сопротивления изоляции обмотки ГП после 6 часов указанной сушки с начального сопротивления увлажненной изоляции 200–300 кОм. Сглаживание переменной составляющей пульсирующего напряжения ЭОС изменялось путем задания нескольких вариантов емкости С-фильтра (0, 2, 4, 6, 10 мкФ), которые соответствовали коэффициенту пульсаций по напряжению 0,2–0,04.

Во время эксперимента влажность окружающей среды составляла 70%, температура 23 °С.

Характеристики изоляции до и после увлажнения, а также в конце ЭОС: сопротивление изоляции после 600 с ($R_{из.600}$); коэффициент абсорбции ($K_{абс}$), коэффициент поляризации ($K_{пол}$) измерялись цифровым мегаомметром Е6-31. Емкость изоляции ($C_{из}$) измерялась промышленным измерителем FLUK 124. Ток утечки и напряжение ЭОС непосредственно во время эксперимента снимались вольтметром и амперметром. Форма напряжения регистрировалась цифровым осциллографом Tektronix TBS1052B-EDU. Обработка данных происходила в пакете Office Excel, в котором применя-

лись встроенные функции для расчета статистических критериев.

Проведение эксперимента

Исследование влияния факторов осуществлялось в следующей последовательности. Изоляция обмоток ГП ТЭД 810-й серии увлажнялась до значения сопротивления изоляции 200–300 кОм парогенератором Grandmaster, подключались мегаомметр Е6-31 и промышленный измеритель Fluke 124. После этого подключалась установка ЭОС (разработана авторами), при этом положительный потенциал подключался к обмоткам ГП ТЭД, а отрицательный — к корпусу ТЭД. Степень сглаживания выходного напряжения изменялась с помощью емкости выходного С-фильтра (фактор А). Величина выходного напряжения (фактор Б) регулировалась автотрансформатором на низкой стороне трансформатора ОЛ-1,25/10-0,22У1. Эксперименты проводились в ручном режиме на одном ТЭД. Структурная схема реализации ЭОС приведена на рис. 2.

Формы напряжений на выходе установки ЭОС, подключенной к ТЭД, приведены на рис. 3.

Эксперимент проводился в течение 6 часов с двумя повторениями. В данный промежуток времени записывались ток утечки и напряжение сушки, по которым определялось сопротивление в момент сушки. Каждые 10 минут записывались промежуточные значения сопротивления. По окончании времени сушки к изоляции обмоток ГП подключались мегаомметр и промышленный измеритель.

До увлажнения изоляции ТЭД показатели были следующие: $R_{из.600} = 250$ МОм; $K_{абс} = 1,85$; $K_{пол} = 1,41$; $C_{из} = 0,014$ мкФ.

Результаты эксперимента для анализа влияния двух факторов (напряжение и емкость С-фильтра) на конечное сопротивление

изоляции ГП ТЭД через 6 часов ЭОС представлены в табл. 1.

Регрессионный анализ и анализ однородности

На основе результатов эксперимента построены графики регрессии и выполнена аппроксимация данных встроенными средствами Excel (рис. 4). Величина достоверности аппроксимации (R^2) составила 0,996 по напряжению (рис. 4, а) и 0,804 по емкости С-фильтра (рис. 4, б).

На следующем этапе выполнена проверка нулевой гипотезы $F_1(x) = F_2(x)$ об однород-

ности выборок n_1 и n_2 (табл. 2) с помощью критерия Вилкоксона [9] при альтернативной гипотезе $F_1(x) \neq F_2(x)$, поскольку объем выборок n_1 и n_2 больше 25. В нашем случае в двух повторениях эксперимента выборка содержала по 30 значений. Достоинство этого критерия заключается в том, что он применим к случайным величинам, распределения которых неизвестны. Требуется лишь, чтобы величины были непрерывными.

Значения из табл. 2 располагаются в виде одного вариационного ряда табл. 3. Из этого ряда определяется сумма порядковых номеров ($W_{\text{набл}}$) (рангов) первой и второй выборки.

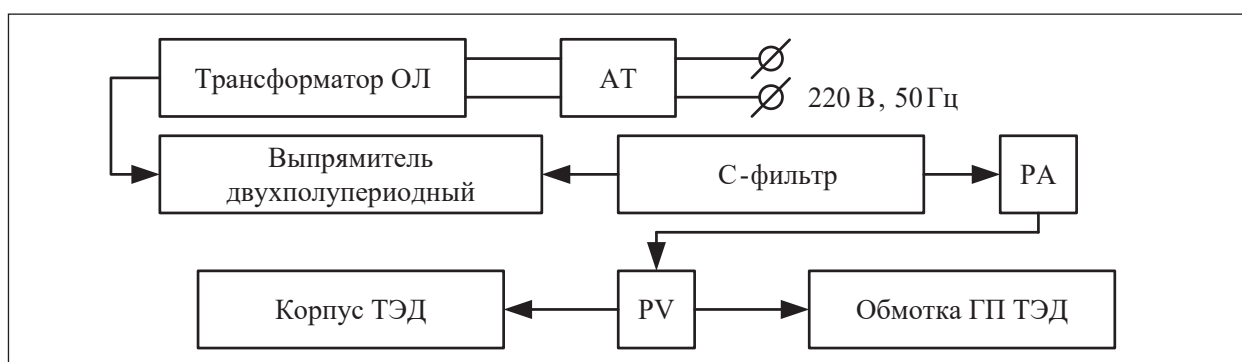
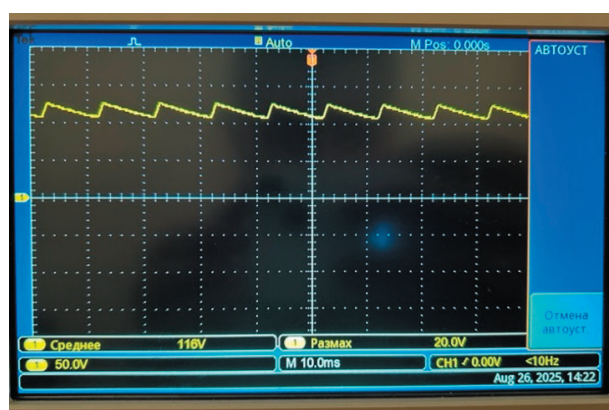
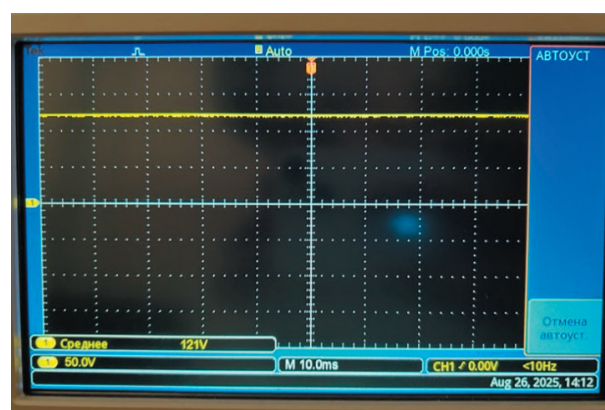


Рис. 2. Структурная схема установки ЭОС:

АТ — автотрансформатор; РА — амперметр; PV — вольтметр



а



б

Рис. 3. Формы напряжения на выходе устройства ЭОС: а — несглаженное (коэффициент пульсаций 0,2); б — сглаженное (емкость фильтра 10 мкФ, коэффициент пульсаций 0,04)

ТАБЛИЦА 1. Сопротивление электрической изоляции ТЭД 810-й серии после ЭОС, МОм

		Фактор А					
		C = 0 мкФ	C = 2 мкФ	C = 4 мкФ	C = 6 мкФ	C = 8 мкФ	C = 10 мкФ
Фактор Б	U = 500 В	10,6	7,5	3,6	2,7	2,4	2,7
		11,5	4,5	6,5	3,8	3,5	2,8
	U = 1000 В	15,7	7,8	10,5	8,6	5,5	3,8
		13,5	5,8	7,3	6,5	5,1	5,5
	U = 1500 В	19,8	9,8	11,2	11,8	7,5	6,7
		17,5	8,5	11,5	10,7	8,9	7,1
	U = 2000 В	22,3	14,6	18,1	11,4	12,3	13,5
		18,6	12,8	19,3	13,5	11,5	14,0
	U = 2500 В	28,1	21,3	24,3	19,7	17,8	20,1
		33,1	23,3	22,5	19,8	22,4	17,6

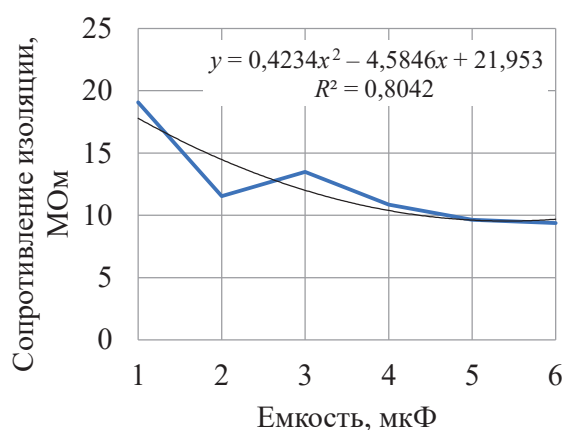
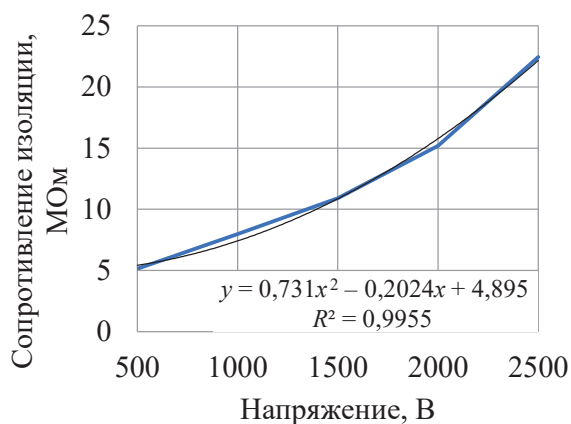


Рис. 4. Регрессионный анализ зависимости сопротивления изоляции в результате ЭОС от напряжения (а) и емкости С-фильтра (б)

Для одинаковых значений используются средние ранги.

Сумма рангов по табл. 3 для первой выборки $W_{набл.1} = 920$, а для $W_{набл.2} = 910$.

В результате проведения ранжирования и вычисления суммы рангов выборки получаем наблюдаемое значение критерия Вилкоксона с меньшей суммой $W_{набл} = 910$. Нижнее критическое значение критерия ($W_{ниж.кр}$) при

уровне значимости $\alpha = 0,05$ находится по формуле:

$$W_{ниж.кр} \left(\frac{\alpha}{2}; n_1; n_2 \right) = \left[\frac{(n_1 + n_2 + 1)n_1 - 1}{2} - z_{кр} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \right], \quad (1)$$

ТАБЛИЦА 2. Выборка для анализа однородности по критерию Вилкоксона, МОм

Выборка 1 (n_1)						Выборка 2 (n_2)					
10,6	7,5	3,6	2,7	2,4	2,7	11,5	4,5	6,5	3,8	3,1	2,8
15,7	7,8	10,5	8,6	5,5	3,8	13,5	5,8	7,3	6,5	5,1	5,5
17,5	8,5	11,3	10,7	8,9	7,1	17,5	8,5	11,3	10,7	8,9	7,1
18,6	12,8	19,3	13,5	11,5	14	18,6	12,8	19,3	13,5	11,5	14
33,1	23,3	22,5	19,8	22,4	17,6	33,1	23,3	22,5	19,8	22,4	17,6

ТАБЛИЦА 3. Ранжированный ряд, МОм (n_1 — серые ячейки, n_2 — белые ячейки)

Ряд	2,4	2,7	2,7	2,8	3,1	3,6	3,8	3,8	4,5	5,1	5,5	5,5
Ранг	1	2,5	2,5	4	5	6	7,5	7,5	9	10	11,5	11,5
Ряд	5,8	6,5	6,5	7,1	7,1	7,3	7,5	7,8	8,5	8,5	8,6	8,9
Ранг	13	14,5	14,5	16,5	16,5	18	19	20	21,5	21,5	23	24,5
Ряд	8,9	10,5	10,6	10,7	10,7	11,3	11,3	11,5	11,5	11,5	12,8	12,8
Ранг	24,5	26	27	28,5	28,5	30,5	30,5	33	33	33	35,5	35,5
Ряд	13,5	13,5	13,5	14	14	15,7	17,5	17,5	17,6	17,6	18,6	18,6
Ранг	38	38	38	40,5	40,5	42	43,5	43,5	45,5	45,5	47,5	47,5
Ряд	19,3	19,3	19,8	19,8	22,4	22,4	22,5	22,5	23,3	23,3	33,1	33,1
Ранг	49,5	49,5	51,5	51,5	53,5	53,5	55,5	55,5	57,5	57,5	59,5	59,5

где $z_{кр}$ находится с помощью равенства:

$$\Phi(z_{кр}) = (1 - \alpha)/2, \quad (2)$$

а верхнее критическое значение ($W_{верх.кр}$) по формуле:

$$W_{верх.кр} \left(\frac{\alpha}{2}; n_1; n_2 \right) = (n_1 + n_2 + 1)n_1 - W_{нижн.кр} \left(\frac{\alpha}{2}; n_1; n_2 \right). \quad (3)$$

В результате при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по формулам (1), (2), (3) получаем:

$$W_{нижн.кр1} = 883; W_{нижн.кр2} = 947.$$

Поскольку выполняется неравенство:

$$W_{нижн.кр1} < W_{набл} < W_{нижн.кр2}, \quad (4)$$

$$883 < 910 < 947,$$

то можно сделать вывод о том, что нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу об однородности выборок.

Двухфакторный дисперсионный анализ

Поскольку возможно влияние взаимодействующих факторов между собой, то следует применить дисперсионный анализ с целью выбора наиболее значимых факторов и их взаимодействия для оценки влияния на исследуемый процесс с помощью двухфакторного дисперсионного анализа для связанных выборок [10]. Проанализируем действие двух факторов на две группы измерений при одинаковых факторах. Для этого были проверены четыре нулевые статистические гипотезы:

1. Фактор напряжения в процессе ЭОС не влияет на сопротивление изоляции.

2. Фактор емкости С-фильтра в процессе ЭОС не влияет на сопротивление изоляции.

3. Влияние фактора напряжения одинаково при различных значениях фактора емкости С-фильтра.

4. Влияние фактора различия выборок на сопротивление изоляции.

Определены критические значения критерия F Фишера:

$F_{U_{кр}} = 171,9$; $F_{C_{кр}} = 76,9$; $F_{И_{кр}} = 2,12$; $F_{UC_{кр}} = 4,35$ для сопоставления с эмпирическими значениями. Решение о принятии или отвержении гипотезы принимается по условию [10]:

$F_U < F_{U_{кр}}$; $F_C < F_{C_{кр}}$; $F_{И} > F_{И_{кр}}$; $F_{UC} < F_{UC_{кр}}$.

В результате вычислений получены следующие наблюдаемые и критические значения при уровне значимости α , которые сведены в табл. 4.

Из результатов выполненного двухфакторного дисперсионного анализа следует, что факторы напряжения и емкости С-фильтра по отдельности значительно влияют на ЭОС изоляции ТЭД, при этом взаимодействие факторов оказалось незначимым, то есть факторы не зависят друг от друга. Фактор различия выборок также оказался незначимым.

Результаты и обсуждение

Согласно регрессионной модели, установлено, что величина напряжения ЭОС оказывает большее влияние на выведение влаги из сло-

ев изоляции ТЭД, нежели емкость С-фильтра на выходе устройства ЭОС.

Однородность выборки была оценена с помощью критерия Вилкоксона, который показал, что нулевую гипотезу об однородности выборки $F_1(x) = F_2(x)$ нет оснований отвергать. Это показывает, что эксперимент был выполнен без нарушений.

С помощью двухфакторного дисперсионного анализа для связанных выборок было проанализировано действие двух факторов на две группы измерений. Были проверены четыре нулевые статистические гипотезы, в результате чего было выявлено, что на сопротивление изоляции влияют только изменение факторов напряжения и емкости С-фильтра. Взаимодействие факторов и фактор различия выборок значимо не влияют на конечное сопротивление изоляции.

Выводы

Из результатов проведенного исследования по оценке влияния величины выходного пульсирующего напряжения и степени его сглаживания с помощью С-фильтра на эффективность ЭОС следует, что с увеличением напряжения ЭОС от 500 до 2500 В сопротивление изоляции ГП ТЭД на момент окончания ЭОС увеличивается в квадратичной зависимости на 210%, а с уменьшением коэффициента пульсации от 0,2 до 0,04 снижается на 45%. Это объясняется уравнением Гельмгольца — Смолуховского, связывающим скорость движения молекул жидкости с напряженностью электрического поля [11].

ТАБЛИЦА 4. Результаты вычислений двухфакторного дисперсионного анализа

Факторы	$F_{эмп}$	α	$F_{кр}$	H_0	Значимость фактора
1. Фактор U	173,3	0,00001	171,9	Отвергается	Значим
2. Фактор C	100,1	0,00001	76,9	Отвергается	Значим
3. Взаимодействие факторов	1,21	0,05	2,12	Принимается	Незначим
4. Фактор различия выборок	0,06	0,05	4,35	Принимается	Незначим

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что они могут использоваться для разработки технологии ЭОС ТЭД в условиях сервисного депо, что позволит сократить время сушки и повысить конечное сопротивление изоляции ГП.

Научный интерес представляет также вопрос оценки эффективности ЭОС с импульсной формой выходного напряжения, что является темой дальнейших исследований авторов.

Список источников

1. Вайда Д. Исследования повреждений изоляции. М.: Энергия, 1968. 400 с.
2. Сравнительная оценка различных способов сушки изоляции обмоток электродвигателей / А. Е. Немировский [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2022. Т. 25, №4. С. 354–364.
3. Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей локомотива / М. Ю. Хажеева [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, №2. С. 508–516.
4. Орлова М. А., Дульцева Е. В. Совершенствование технологии сушки тяговых двигателей электровозов // Молодежная наука: труды XXVI Всероссийской студенческой научно-практической конференции КриЖТ ИрГУПС (Красноярск, 22 апреля 2022 года). Т. 2. Красноярск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2022. С. 244–249.
5. Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю. Электроосмотическая сушка и влагозащита электрооборудования // Федоровские чтения — 2017: XLVII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 15–17 ноября 2017 года). М.: ИД МЭИ, 2017. С. 166–170.
6. Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин: патент №2174280 Российская Федерация, МПК H02K 15/12 15/00. №2000132540/09 / Мороз Н. К., Немировский А. Е., Симаков К. П.; заявл. 26.12.2000; опубл. 27.09.2001. 7 с.
7. Третьяков Е. А., Балагин О. В., Живушко С. В. Повышение эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей на основе электрокинетических явлений // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82, №3. С. 236–245.
8. Результаты испытаний сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе электрокинетических явлений в условиях депо / Е. А. Третьяков [и др.] // Транспорт Урала. 2023. №2 (77). С. 92–96.
9. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
10. Сидоренко Е. В. Методы математической обработки в психологии. СПб.: Речь, 2004. 350 с.
11. Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия: учеб. для вузов. 7-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2025. 444 с.

Дата поступления: 20.10.2025

Решение о публикации: 18.01.2026

Контактная информация:

ЖИВУШКО Сергей Владиславович — аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог»; s.zhivushko@yandex.ru

ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович — д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог»; eugentr@mail.ru

ГАТЕЛЮК Олег Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика»; oleg.gatelyuk.61@mail.ru

Assessment of factors influencing electroosmotic drying of moistened insulation in locomotive traction electric motors

S. V. Zhivushko, E. A. Tretiakov, O. V. Gatelyuk

Omsk State Transport University, 35 Marksa pr., Omsk, 644046, Russia

For citation: Zhivushko S.V., Tretiakov E.A., Gatelyuk O.V. Assessment of Factors Influencing Electroosmotic Drying of Moistened Insulation in Locomotive Traction Electric Motors // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 17–26. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-17-26. (In Russian)

Abstract

Objective: to assess the factors influencing the electroosmotic drying rate of moistened insulation of windings in a traction DC motor. **Methods:** experimental study with processing of results using mathematical statistics methods. **Results:** two series of experiments on electroosmotic drying of moistened insulation in a traction DC motor were carried out at different applied voltages and C-filter capacitances. A sample comprising 60 insulation resistance measurements of the TEM main poles, 30 per series, was obtained. Regression analysis was performed, yielding coefficients of determination of 0.996 with respect to voltage and 0.804 with respect to C-filter capacitance. The consistency of the experimental data was confirmed by the Wilcoxon test. A two-factor analysis of variance for related samples was also carried out. The applied voltage and the C-filter capacitance each exerted a significant effect on the electroosmotic drying rate. The individual-difference and the sample-difference factors were determined as insignificant. Increasing the electroosmotic drying voltage from 500 to 2500 V have produced a quadratic rise in the insulation resistance of the main poles amounting to 210%, whereas lowering the ripple coefficient from 0.2 to 0.04 yielded a 45% reduction in insulation resistance. **Practical significance:** the data obtained can be employed to develop an electroosmotic drying technology for TEM in depot service during subzero temperatures periods.

Keywords: rolling stock, traction electric motor, winding, insulation, moisture, drying, electroosmosis, regression analysis, rank method, Wilcoxon test, two-factor analysis of variance, unrelated sample

References

1. Vajda D. Issledovaniya povrezhdenij izolyatsii. M.: Energiya, 1968. 400 s. (In Russian)
2. Sravnitel'naya otsenka razlichnykh sposobov sushki izolyatsii obmotok elektrodvigatelej / A. E. Nemirovskij [i dr.] // Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2022. T. 25, no. 4. S. 354–364. (In Russian)
3. Issledovanie sushchestvuyushchikh metodov sushki uvlazhnennoj izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej lokomotiva / M. Yu. Khazheeva [i dr.] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, no. 2. S. 508–516. (In Russian)
4. Orlova M. A., Dul'tseva E. V. Sovershenstvovanie tekhnologii sushki tyagovykh dvigatelej elektrovozov // Molodezhnaya nauka: trudy XXVI Vserossijskoj studentcheskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii KrIZhT IrGUPS (Krasnoyarsk, 22 aprelya 2022 goda). T. 2. Krasnoyarsk: Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2022. S. 244–249. (In Russian)
5. Nemirovskij A. E., Kichigina G. A., Sergievskaya I. Yu. Elektroosmoticheskaya sushka i vlagozashchita elektrooborudovaniya // Fyodorovskie chteniya — 2017: XLVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s elementami nauchnoj shkoly (Moskva, 15–17 noyabrya 2017 goda). M.: ID MEI, 2017. S. 166–170. (In Russian)

6. Sposob elektroosmoticheskoy sushki izolyatsii obmotok elektricheskikh mashin: patent No. 2174280 Rossijskaya Federatsiya, MPK N02K 15/12 15/00. No. 2000132540/09 / Moroz N. K., Nemirovskij A. E., Simakov K. P.; zayavl. 26.12.2000; opubl. 27.09.2001. 7 s. (In Russian)

7. Tret'yakov E. A., Balagin O. V., Zhivushko S. V. Povyshenie ekspluatatsionnoj nadezhnosti elektrovozov za schet snizheniya uvlazhnennosti izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej na osnove elektrokineticheskikh yavlenij // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2023. T. 82, no. 3. S. 236–245. (In Russian)

8. Rezul'taty ispytanij sushki uvlazhnennoj izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej elektrovozov na osnove elektrokineticheskikh yavlenij v usloviyakh depo / E. A. Tret'yakov [i dr.] // Transport Urala. 2023. No. 2 (77). S. 92–96. (In Russian)

9. Kobzar' A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. M.: Fizmatlit, 2006. 816 s. (In Russian)

10. Sidorenko E. V. Metody matematicheskoy obrabotki v psikhologii. SPb.: Rech', 2004. 350 s. (In Russian)

11. Shchukin, E. D., Pertsov A. V., Amelina E. A. Kolloidnaya khimiya: ucheb. dlya vuzov. 7-e izd., ispr. i dop. M.: Yurajt, 2025. 444 s. (In Russian)

Received: 20.10.2025

Accepted: 18.01.2026

Author's information:

Sergei V. ZHIVUSHKO — Post-graduate student of the Department of “Electric Rolling Stock”; s.zhivushko@yandex.ru

Evgenii A. TRETIAKOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of “Electric Rolling Stock”; eugentr@mail.ru

Oleg V. GATELYUK — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of “Higher Mathematics”; oleg.gatelyuk.61@mail.ru

УДК 629.47

Вероятностный анализ отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта с использованием технологии цифрового двойника

А. А. Иванов¹, А. С. Шинкарук², И. А. Вишняков¹

¹ Российский университет транспорта, Россия, 127055, Москва, Новосущевская ул., 22, стр. 1

² Акционерное общество «Федеральная пассажирская компания», Россия, 107078, Москва, ул. Маши Порываевой, 34.

Для цитирования: Иванов А. А., Шинкарук А. С., Вишняков И. А. Вероятностный анализ отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта с использованием технологии цифрового двойника // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 27–40. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-27-40

Аннотация

Цель: одно из основных направлений цифровой трансформации экономики — внедрение технологий, основанных на применении цифровых двойников объектов. В статье рассмотрен вариант использования этой технологии для анализа периода нахождения пассажирского вагона в неиспользуемом парке для проведения его планового ремонта, продолжительность которого влияет на общую величину непроизводительного простоя подвижного состава и эффективность работы пассажирского комплекса. Предложено использовать самонастраивающиеся технологии и математические модели временных составляющих процесса, связанного с отвлечением от перевозок пассажирского вагона для проведения планового ремонта крупного объема (капитального и деповского). Рассмотрены поэлементные периоды отвлечения от эксплуатационного процесса — от момента перевода пассажирского вагона в нерабочий парк (в информационной системе) с отцепкой от состава до возвращения его в поезд после выполненного планового ремонта. Определение законов распределения для каждой составляющей процесса позволяет обосновать планируемую загрузку ремонтных мощностей предприятий, объем наличного эксплуатационного парка вагонов с последующей привязкой к суточному графику работы станции формирования поездов, а также планировать мощность вагоноремонтной базы для выполнения деповского и капитального ремонта. В работе приведен пример использования цифрового двойника процесса отвлечения пассажирского вагона в неиспользуемом (нерабочем) парке для проведения планового ремонта. В статье рассматриваются использование самонастраивающейся технологии и математические модели временных составляющих процесса, связанного с отвлечением от перевозок пассажирского вагона для проведения планового ремонта крупного объема. **Метод:** вероятностно-статистический анализ. **Результаты:** предложенный метод дает возможность в режиме реального времени планировать и корректировать эксплуатационные показатели эффективности использования вагонного парка по мере накопления статистической информации с учетом возможных возникновений форс-мажорных обстоятельств, а также моделировать случайное отклонение от нормируемых продолжительностей (при наличии последних). **Практическая значимость:** результаты работы имеют практическое значение для структурных предприятий вагоноремонтного комплекса, а также для собственников, перевозчиков и операторов нетягового подвижного состава.

Ключевые слова: пассажирский вагон, плановый ремонт крупного объема, организация процесса отвлечения вагона для планового ремонта, случайная величина, вероятностная модель, технология цифрового двойника

Введение

В коммерческих компаниях и на промышленных предприятиях для повышения эффективности совершенствуют производственные процессы и в приоритетном порядке внедряют цифровые технологии четвертой промышленной революции [1, 2]. Для перспективной и важной цифровой трансформации используют цифровые двойники объектов, позволяющие моделировать процессы в режиме реального времени [3].

В машиностроении широко применяют технологии цифрового двойника, позволяющие при создании сложных технических объектов, таких как автомобиль, самолет, реактивные турбины и др., моделировать параметры конструкций и нагрузки, закладывать различные технические, прочностные характеристики, свойства материалов и т. п. Применение цифровых двойников в автомобилестроении позволило на 30% снизить расходы при проектировании новых моделей, исключить дорогие краш-тесты и испытания физических прототипов автомобилей. В настоящее время их выполняют с помощью математических моделей и специализированных программных продуктов. Возможности цифровизации широко используют в промышленном дизайне, для компоновки, интерьерного и экстерьерного проектов объектов. Кроме того, технологии цифрового двойника сокращают в 2 раза (с 30 до 16 месяцев) период от разработки проекта до момента начала серийного производства новых моделей автомобилей [4].

При проектировании кузова и экипажной части железнодорожного тягового и нетягового подвижного состава обязательно моделируют напряженно-деформированное состояние конструкций, исследуют влияние динамических эксплуатационных нагрузок с применением цифровых моделей (цифровых

двойников) узлов и элементов. Возможности специальных программных комплексов при обосновании работоспособности конструкций, их долговечности и безотказности позволяют существенно сократить срок разработки новых типов вагонов и локомотивов [5]. Также на железнодорожном транспорте интенсивно внедряют цифровые технологии для управления процессом движения поездов в режиме реального времени, разработки новых графических ниток, а также диспетчеризации при нештатных ситуациях и нарушении графика. Технологии цифрового двойника широко применяют для организации и планирования производственных процессов на предприятиях по ремонту тягового и моторвагонного подвижного состава [6].

Элементы концепции технологии цифрового двойника непосредственно зависят от целей исследований и решаемых задач, а объектами могут быть как физические прототипы, так и процессы.

Линейным предприятиям пассажирского вагонного хозяйства цифровые технологии позволят усовершенствовать производственные процессы, связанные с эксплуатацией инвентарного вагонного парка [1, 2]. В настоящее время в АО «ФПК» функционирует автоматизированная информационная система АСУ ПВ (автоматизированная система управления пассажирским вагоном). В системе по каждому пассажирскому вагону ведут учет эксплуатационных характеристик, текущих параметров колесных пар и других элементов, маршрутов курсирования, суммарных пробегов, неплановых ремонтов, контролируют сроки плановых ремонтов и технических обслуживаний.

Несмотря на увеличение межремонтных периодов пассажирских вагонов, растет продолжительность их отвлечения от перевозочного процесса для планового ремонта

крупного объема. С одной стороны, проводят укрупнение пассажирских вагонных депо, закрывают малоэффективные предприятия, чтобы повысить качество ремонта обновленного вагонного парка. При одновременном увеличении межремонтных периодов это приводит к сокращению ремонтных предприятий по сети. С другой стороны, возникают дополнительные непроизводительные простои вагонов из-за выполнения устаревших нормативов и новых дополнительных операций, например пересылка на вагоноремонтное предприятие. Ранее пересылка была необходима при капитальном ремонте пассажирских вагонов на вагоноремонтных заводах. Доля таких операций составляла менее 10%. В настоящее время, по информации АСУ ПВ, например, для вагонов моделей 61-4440 фактическое время, на которое вагон изымают из перевозочного процесса для ремонта в условиях вагонного депо (продолжительность отвлечения для проведения депоовского ремонта), может достигать 210 суток. При этом нормируемая продолжительность непосредственно ремонта и его ожидания составляет 6 суток. Таким образом, можно отметить, что существуют проблемы в организации депоовских и капитальных ремонтов. Действующие правила организации ремонта снижают производительность вагона. При этом для заданного объема перевозок необходим больший вагонный парк из-за его нерационального использования. Новые цифровые технологии позволят расширить возможности существующей системы АСУ ПВ и интегрировать в нее новые и перспективные инструменты, такие как учет местонахождения объекта (позиционирование), взаимодействие с мобильными устройствами, интернет вещей и др. Рассмотрим возможности технологии цифрового двойника, чтобы проанализировать

и смоделировать процесс отвлечения пассажирского вагона от непосредственного использования по назначению (то есть нахождение в нерабочем парке) для планового ремонта крупного объема.

Собираемая статистическая информация АСУ ПВ позволяет анализировать продолжительность различных состояний пассажирского вагона в процессе эксплуатации. Для планового ремонта вагон переводят в нерабочий парк, отцепляют от прибывшего в пункт формирования состава пассажирского поезда. Постановку отремонтированного вагона в состав можно считать окончанием процесса отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта. Этот период включает как непосредственный технологический процесс ремонта, продолжительность которого нормируют для каждой модели вагона по объему и средней трудоемкости выполняемых работ, так и подготовительно-заключительные операции. Разработанная блок-схема анализа процесса отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта показана на рис. 1.

При необходимости проведения планового ремонта (блок 2) пассажирский вагон переводят в нерабочий парк, исключают из состава поезда и переставляют на пути резерва станции формирования, выполняют подготовительные операции (работы N_1): снятие мягкого и жесткого инвентаря, влажную уборку, а также охрану. Продолжительность этого периода обозначим ΔT_1 .

Если вагоноремонтное предприятие и пункт формирования, на котором находится объект ремонта, расположены на разных станциях, то необходимо транспортировать вагон на станцию ремонтного предприятия (блок 4) и организовать его сопровождение.

Вагон ожидает прицепки в состав пассажирского или грузового поезда и следует на

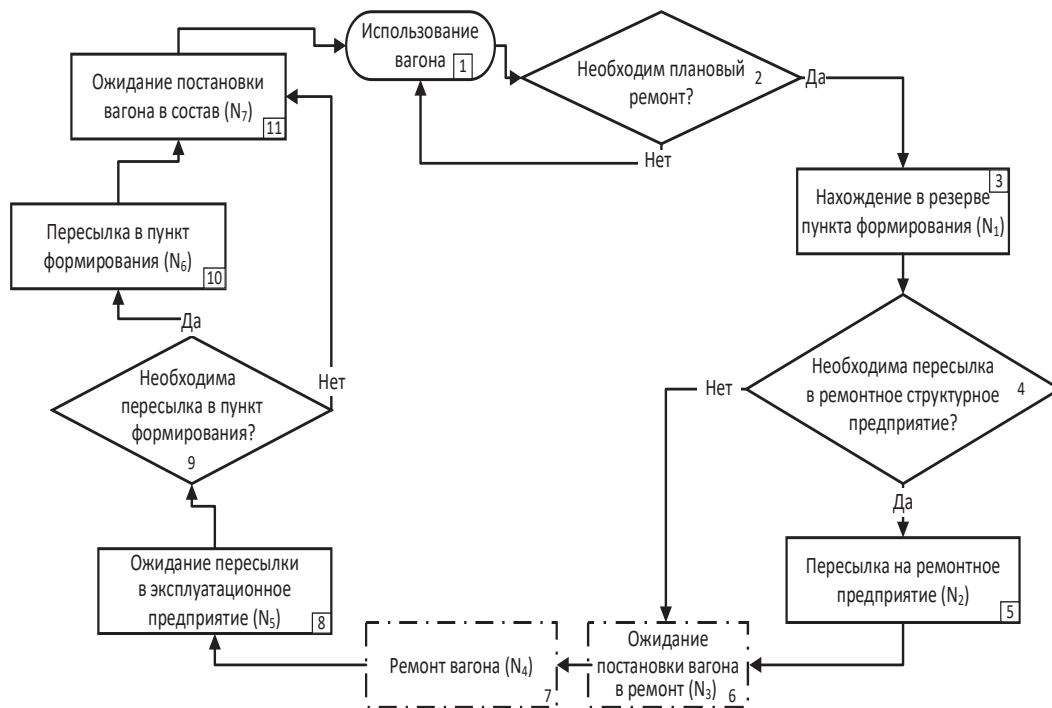


Рис. 1. Процесс анализа отвлечения вагона для проведения ремонта крупного объема

ремонтное предприятие N_2 (блок 5). Продолжительность периода обозначим ΔT_2 .

Если объект ремонта и ремонтное предприятие находятся в границах одной станции, то вагон передают на подъездные пути депо N_3 (блок 6). Здесь вагон ожидает, когда его поставят на ремонтные позиции вагонсборочного участка. Длительность ожидания ремонта обозначим ΔT_3 .

Непосредственно регламентные диагностические и ремонтные работы N_4 (блок 7) начинают, когда вагон поставлен на ремонтные позиции. Продолжительность ремонта обозначим ΔT_4 .

После окончания ремонта вагон передают на подъездные пути предприятия N_5 (блок 8), где он ожидает перестановки на стационарные пути либо пункта формирования поездов, либо станции. Здесь принимают отремонтированный вагон и организуют охрану. Продолжительность периода обозначим ΔT_5 .

Если пункт формирования и вагоноремонтное предприятие, на котором находится отремонтированный вагон, расположены на разных станциях (блок 9), то необходимо транспортировать вагон и организовать сопровождение.

Вагон ожидает прицепки в состав пассажирского или грузового поезда и следует в пункт формирования N_6 (блок 10). Продолжительность периода обозначим ΔT_6 .

Если транспортировка завершена или вагон находится на путях станции формирования поездов, то его принимает специальная комиссия эксплуатирующей организации. Одновременно вагон готовят к перевозкам, оснащают съемным мягким и жестким инвентарем N_7 (блок 11) и переставляют на резервные пути станции формирования. Здесь вагон ожидает постановки в состав поезда. Суммарную продолжительность периода обозначим ΔT_7 .

Периоды ΔT_3 и ΔT_4 регламентированы в нормативно-технической документации для каждо-

го вида планового ремонта по каждой модели вагона [5]. Остальные периоды не нормированы, хотя их величина может превышать продолжительность самого ремонта. Это существенно снижает эффективность работы и коэффициент готовности вагона, проблемы оценки которого системно рассмотрены в работе [8] на примере высокоскоростных поездов.

Кроме того, простой ΔT_7 возрастает, когда отремонтированный вагон не востребуем в перевозочном процессе и простаивает на путях технического перестоя станции формирования, находясь в резерве. Это происходит, поскольку для сохранения схемы состава поезда направляемый в ремонт вагон всегда заменяют аналогичным из резерва. Поэтому отремонтированный вагон попадает в резерв пункта формирования. Вагон ожидает постановки в поезд, пока не потребуется замена неисправного вагона такого же типа или увеличение длины состава. Наибольшие простои в резерве — у специализированных пассажирских вагонов: вагонов-буфетов, вагонов-радиостанций, вагонов с купе для инвалидов, вагонов-ресторанов, спальных вагонов, вагонов люкс и др. (то есть вагонов, предоставляющих специальные услуги).

Простои в резерве возникают при любой отцепке вагона от состава поезда: для проведения планового ремонта, ТО-3 (единой технической ревизии), текущего отцепочного ремонта или специальных санитарных обработок.

Приведенные на рис. 1 блоки могут быть в дальнейшем детализированы и разбиты на подпроцессы.

Эксплуатирующая компания должна, с одной стороны, на период отвлечения вагона обеспечить его замену в составе поезда аналогичной моделью, с другой — обеспечить равномерную загрузку вагоноремонтного предприятия и ритмичную поставку объектов

ремонта. При этом могут возникать непроизводственные перепростои вагонов парка, связанные с несвоевременным исключением вагона из перевозочного процесса из-за отсутствия аналогичной модели в резерве или с ожиданием постановки вагона на позиции ремонтного предприятия.

Часто в эксплуатации при организации технологических процессов считают детерминированной продолжительность операций, часть которых может быть нормированной. При этом продолжительность операции считают постоянной с нулевым рассеиванием либо равной математическому ожиданию случайной величины длительности процесса без учета характеристик рассеивания. Такой подход наименее эффективен, поскольку без учета характеристик рассеивания могут возникать авральные режимы работы линейных предприятий.

В настоящее время вычислительные возможности и цифровые технологии позволяют получать рассмотренные выше составляющие процесса отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта в виде случайных величин.

Чтобы определить случайную величину, необходимо получить закон распределения — вероятностную модель продолжительности рассматриваемого процесса. Для описания работы предприятий вагонного комплекса наиболее часто применяют вероятностные модели экспоненциального (показательного), нормального и логарифмически нормального (логнормального) законов распределений [9].

Плотность экспоненциального закона распределения случайной величины:

$$f(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}, \quad (1)$$

где λ_i — параметр закона распределения времени выполнения i -й операции, точечную оценку которого определяют по статистическим данным. Параметр связан с величиной

математического ожидания M_i длительности i -й операции: $\lambda_i = 1/M_i$.

Плотность нормального закона распределения имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (2)$$

где M_i — математическое ожидание продолжительности выполнения i -й операции; σ_i — среднеквадратическое отклонение этой величины.

Точечные оценки этих показателей получают на основе статистической информации. Закон имеет симметричное распределение вероятностей относительно математического ожидания случайной величины. Эта особенность не позволяет использовать его при определении случайных величин ΔT_i .

Плотность логарифмически нормального закона распределения случайной величины имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - M_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (3)$$

здесь M_i — математическое ожидание логарифма продолжительности i -й операции; σ_i — среднеквадратическое отклонение этой величины. Их оценки также можно получить по статистическим данным:

$$\begin{aligned} M_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln \Delta T_{ij}, \\ \sigma_i &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\ln \Delta T_{ij} - M_i)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где n — количество проведенных испытаний; ΔT_{ij} — значение, которое приняла случайная величина продолжительности i -й операции в j -м наблюдении за процессом ремонта вагона.

Закон применяют, когда логарифм случайной величины имеет нормальное распре-

деление. Эта модель, в отличие от нормального распределения, несимметрична. Поэтому для моделирования составляющих процесса отвлечения ΔT_i по технологии цифрового двойника использован логарифмически нормальный закон распределения.

Существующая информационная система АСУ ПВ позволяет в соответствии со стандартным планом испытаний на надежность типа $[N U N]$ организовать эксперимент для пассажирских вагонов рассматриваемой модели и получить точечные оценки параметров законов распределения заданного вида.

Проверка однородности выборок с помощью правила трех сигм показала, что результаты экспериментов неоднородны, то есть имеют элементы с чужими законами распределения. Пример результата анализа выборок на однородность и приведение выборки к однородной приведены в табл. 1.

Полученные точечные оценки параметров логарифмически нормальных законов распределения всех семи составляющих ΔT_i приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Качество полученных точечных оценок параметров законов распределений проверено по критерию Пирсона [9]. Результат проверки, расчетные и табличные значения критерия Пирсона приведены в табл. 2. В результате получены средние значения для всех ΔT_i и характеристики рассеивания. Как видно из табл. 2, средние значения ΔT_3 и ΔT_4 больше нормативных значений. Это свидетельствует, что необходимо либо корректировать нормативы простоев, либо изменить технологические процессы на вагоноремонтных предприятиях на основе их детального анализа.

Предлагаемая технология цифрового двойника на основе разработанной модели процесса отвлечения (рис. 1) и технологии формирования вероятностных моделей

ТАБЛИЦА 1. Результаты приведения выборки к однородной

№ п/п	Состояние, N_i	Для исходной выборки							Результат проверки однородности выборки	Для выборки, приведенной к однородной			число отброшенных элементов
		число элементов N	мин. ΔT_i , сут.	макс. ΔT_i , сут.	$M\Delta T_i$, сут.	s_i , сут.	$M\Delta T_i - 3s_i$, сут.	$M\Delta T_i + 3s_i$, сут.		число элементов	мин. ΔT_i , сут.	макс. ΔT_i , сут.	
1	N_1	385	1	636	40,8	81,9	-205	286	неоднородн.	221	1	10	164
2	N_2^{**}	163	1	30	4,6	5,3	-11,2	20,5	неоднородн.	152	1	11	11
3	N_3^{**}	163	1	320	23,8	41,8	-102	149,1	неоднородн.	153	1	90	10
4	N_4^*	259	3	70	13,8	11,2	-19,7	47,2	неоднородн.	255	3	45	4
5	N_5^{**}	163	1	115	3,9	12,4	-33,2	41,1	неоднородн.	123	1	55	40
6	N_6^{**}	163	1	34	6,2	6,1	-12,0	24,4	неоднородн.	121	1	14	42
7	N_7	385	1	756	27,8	62,4	-160	214	неоднородн.	377	1	211	8

* для деповского ремонта;

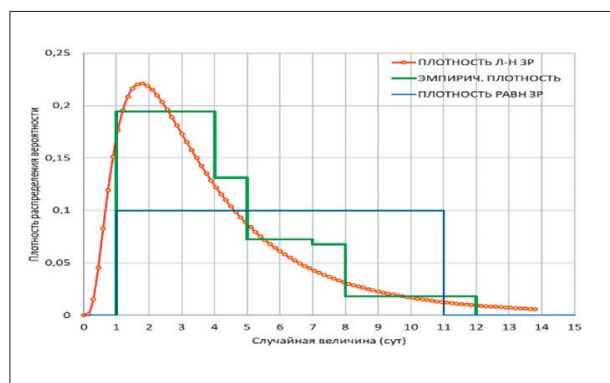
** для вагонов, требующих передислокации.

ТАБЛИЦА 2. Результаты формирования вероятностных моделей продолжительностей нахождения вагона в N_i состоянии

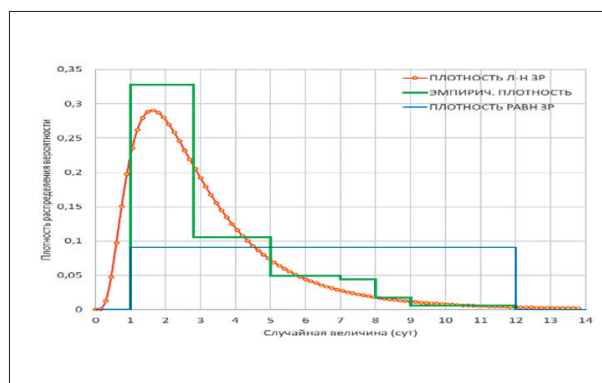
№ п/п	Состояние, N_i	Вид закона распределения	Параметры		Статистика Пирсона	Число степеней свободы, n	$[c^2](\alpha = 0,05, n)$	Согласованность, ДА/НЕТ	Математич. ожидание периода, сут.	Среднее кв. отклон. периода, сут.
			M_i , ln(сут.)	s_i , ln(сут.)						
1	N_1	лог. норм.	1,15	0,766	8,291	6	11,07	ДА	3,16	2,14
2	N_2^{**}	лог. норм.	0,94	0,674	7,130	7	12,59	ДА	2,56	1,96
3	N_3^{**}	лог. норм.	2,06	1,177	17,690	11	18,31	ДА	7,85	3,25
4	N_4^*	лог. норм.	2,38	0,659	13,971	8	14,07	ДА	10,8	1,93
5	N_5^{**}	лог. норм.	1,08	0,391	10,880	6	11,07	ДА	2,95	1,02
6	N_6^{**}	лог. норм.	1,33	0,722	18,200	14	22,36	ДА	3,78	2,06
7	N_7	лог. норм.	2,13	1,348	8,830	7	12,29	ДА	8,42	3,85

* для деповского ремонта;

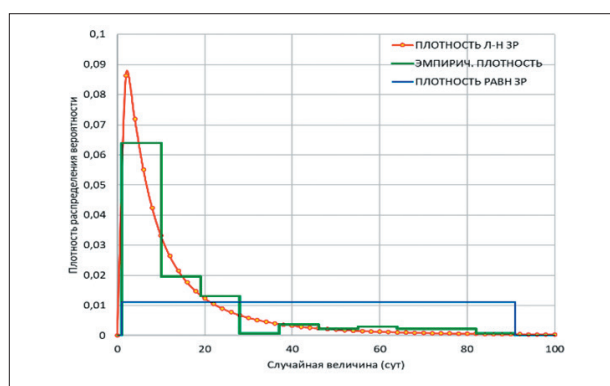
** для вагонов, требующих передислокации.



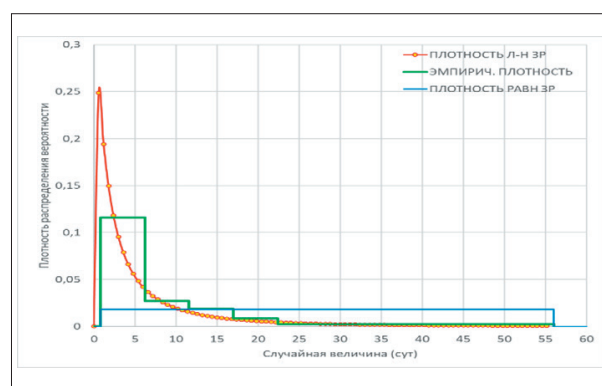
а) в резерве пункта формирования ΔT_1



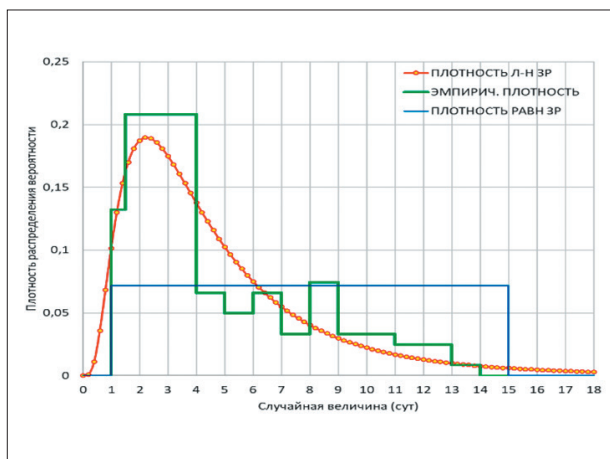
б) пересылка на рем. предприятие ΔT_2



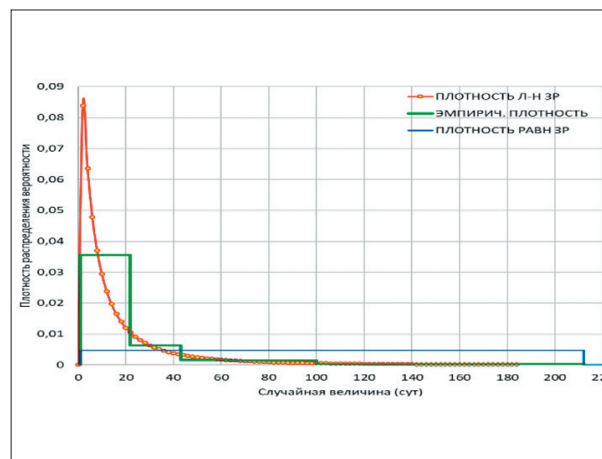
в) ожидание постановки в ремонт ΔT_3



г) ожидание пересылки в пункт формирования ΔT_5



д) пересылка в пункт формирования ΔT_6



е) ожидание прицепки в состав ΔT_7

Рис. 2. Эмпирические и теоретические законы распределения ΔT_i отвлечений вагона от перевозочного процесса для проведения планового ремонта: эмпирические (выборочные) функции плотности распределения — в виде ступенчатых графиков; вероятностные модели, описывающие случайные величины, — в виде гладких кривых с параметрами, приведенными в табл. 2

случайных величин ΔT_i позволяет алгоритмизировать и формализовать процесс прогнозирования простоя вагона в нерабочем парке (рис. 3).

На основе информации АСУ ПВ формируют перечень отвлечений (блок 2). Для вагона формируют маршрут (по рис. 1) — планируемый процесс отвлечения на ремонт (блок 3). В онлайн-режиме формируют цифрового двойника (блок 5), чтобы смоделировать общий период отвлечения и его составляющие. Для этого необходима информация системы АСУ ПВ (блок 6). Производят моделирование (блок 7) общего периода отвлечения и его составляющих.

Если значения, полученные в блоке 7, соответствуют заявленной ожидаемой или нормированной величине, то организывают и проводят ремонт крупного объема (блок 10). В противном случае система корректирует период отвлечения вагона и нахождения в нерабочем парке (блок 9).

Чтобы применить приведенную технологию, нужно смоделировать случайные величины ΔT_i при помощи метода статистических испытаний.

Суть метода моделирования случайных величин, применяемых для цифрового двойника, заключена в построении искусственного случайного процесса, аналогичного реальному,

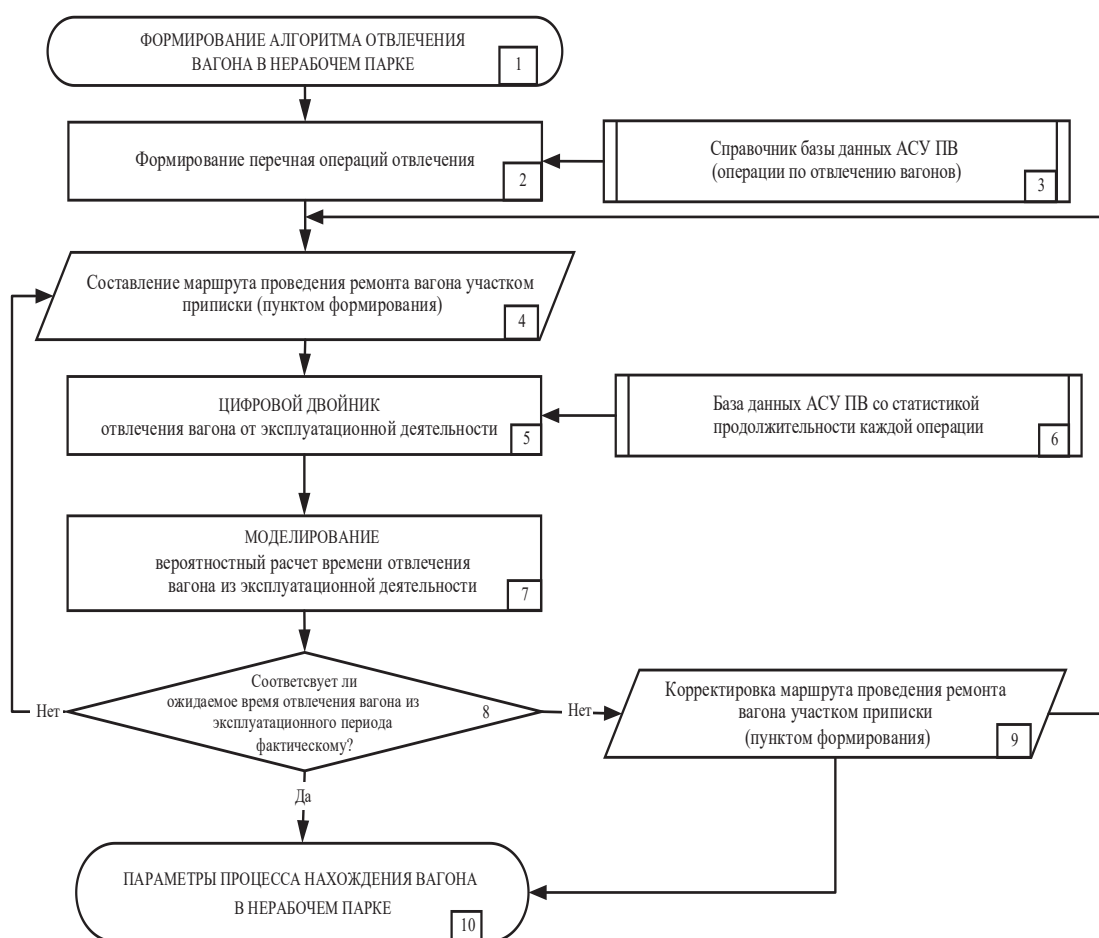


Рис. 3. Процесс построения прогноза отвлечения вагона для проведения планового ремонта

с применением генератора псевдослучайных чисел. Сама операция моделирования (или розыгрыша) случайных величин состоит в формировании ряда значений, имеющих заданный закон распределения, с помощью стандартных средств генерации равномерно распределенных случайных чисел.

Для этого формируют L значений в серии независимых вычислительных опытов и получают ряд значений x_j , $j = \overline{1, L}$ моделируемой случайной величины, которую обозначим x . Требуется получить значение z случайной величины, закон распределения которой совпадает с распределением величины x с известными параметрами: математическим ожиданием (обозначим его $Mx = a$) и дисперсией ($Dx = b$), оценки которых, как описано ранее, можно получить на основе информации АСУ ПВ.

Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, распределение величины суммы x_j

$$(j = \overline{1, L}): \rho_L = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_L \quad (5)$$

является приблизительно нормальным со средним значением $m = La$ и дисперсией $s^2 = Lb^2$. Согласно правилу трех сигм, каковы бы ни были m и s :

$$P\{\mu - 3\sigma < \rho_L < \mu + 3\sigma\} = 0,9973, \quad (6)$$

из которого получают соотношение:

$$P\left\{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L x_j - a < \frac{3b}{\sqrt{L}}\right\} \approx 0,9973. \quad (7)$$

На этом выражении основан метод статистических испытаний, а также оценка погрешности этого метода [9].

Чтобы провести статистические испытания, используют известные способы генерации случайных чисел z , которые основаны на многократном повторении процедуры формирования ограниченного числа L значений x_j , имеющих заданный (известный) закон распределения.

При достаточно большом числе L по закону больших чисел частота событий в серии независимых опытов стремится к вероятности этого события:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} P^* \{X_k \leq x_j < X_{k+1}\} = P\{X_k \leq x_j < X_{k+1}\}, \quad (8)$$

где событие $\{X_k \leq x_j < X_{k+1}\}$ состоит в том, что разыгранное значение x_i окажется в интервале X_k, X_{k+1} ; $P^*\{\cdot\}$ — частота этого события $\{\cdot\}$:

$$P^* \{X_k \leq x_j < X_{k+1}\} = \frac{1}{L} \cdot N_{\{X_k \leq x_j < X_{k+1}\}}, \quad (9)$$

где $N\{\dots\}$ — количество попаданий моделируемой случайной величины x_j на интервал $\{\cdot\}$.

Среднее значение x_j и есть моделируемая случайная величина z :

$$\bar{x} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L x_j \approx z. \quad (10)$$

Величину z моделируют по каждому из семи рассматриваемых состояний отвлечения пассажирского вагона для проведения планового ремонта с известным распределением, точечные оценки параметров которого получены на основе информации АСУ ПВ.

Технология формирования ряда значений x_j ($j = \overline{1, L}$) зависит от вида закона распределения случайной величины.

При гипотезе, что закон распределения случайной величины продолжительности i -го состояния экспоненциальный (1):

$$x_j = -\frac{1}{\lambda_i} \ln P_j, \quad (11)$$

где λ_i — точечная оценка параметра экспоненциального закона распределения случайной величины продолжительности i -го состояния;

P_j — разыгрываемая случайная величина с равномерным распределением в интервале (0;1). Она соответствует уровню a для a -квантиля генерируемой случайной величины x_j .

При гипотезе, что закон распределения нормальный (2):

$$x_j = M_i + \sigma_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{12} P_j - 6 \right), \quad (12)$$

где M_i и s_i — точечные оценки параметров нормального закона распределения случайной величины продолжительности i -го состояния (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение соответственно).

При гипотезе, что закон распределения случайной величины продолжительности i -го состояния логарифмически нормальный (3), генерацию выполняют с помощью выражения 12. При этом M_i и s_i — точечные оценки параметров логарифмически нормального закона распределения случайной величины продолжительности i -го состояния. Получаемые опытные значения соответствуют натуральному логарифму случайной величины, то есть $\ln(x_i)$. Для перехода к единицам времени используют уравнение:

$$x_i = e^{\ln x_i}. \quad (13)$$

В результате моделирования можно получить ряд значений ΔT_i , а интересующий нас в конечном счете общий период отвлечения пассажирского вагона, то есть нахождение в нерабочем парке и простой в резерве:

$$T = \sum_{i=1}^7 \Delta T_i. \quad (14)$$

В рассмотренном примере был применен логарифмически нормальный закон распределения, однако при большей степени детализации процесса или моделировании отклонений

от нормированного значения можно использовать и другие модели.

Собираемая статистическая информация об использовании пассажирского вагона позволяет создавать вероятностные модели продолжительности нахождения его в различных состояниях, моделировать процесс простоя в ремонте, прогнозировать суммарную продолжительность периода отвлечения для проведения ремонта крупного объема.

Часть случайных величин можно считать управляемыми (субъективными), другие — неуправляемыми (объективными). Желательно максимально снизить рассеивание случайных величин, составляющих непроизводительный простой вагона, чтобы процессы были более определены. Применение предложенной технологии цифрового двойника отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта позволит вырабатывать оптимальные решения по устранению несоответствий и снижению материальных и временных потерь.

Таким образом, использование технологий цифрового двойника, основанных на решении задач вероятностно-статистического моделирования процессов эксплуатации, в том числе по предлагаемому алгоритму [10], станет основой разработки киберфизических моделей пассажирских вагонов.

Приведенная технология цифрового двойника процесса позволяет прогнозировать в режиме реального времени отвлечение пассажирского вагона для проведения ремонта крупного объема.

Предлагаемый алгоритм анализа составляющих этого процесса, методика получения законов распределения случайных величин и их моделирование дают возможность в режиме реального времени планировать и корректировать эксплуатационные показатели эффективности вагонного парка по мере накопления статистической

информации, учитывать возможность форс-мажорных обстоятельств, моделировать случайное отклонение от нормируемых продолжительностей (при наличии последних).

Кроме того, внедрение предлагаемой технологии цифрового двойника позволяет выявить закономерности в процессах отвлечения, нарушения в эксплуатации и при сборе информации о простоях пассажирских вагонов в нерабочем парке для проведения ремонта крупного объема, а также помочь обосновать целесообразность пересмотра эксплуатационной нормативной документации пассажирской компании и существующих регламентированных продолжительностей работ [7].

Список источников

1. Влияние обострения глобальных вызовов на стратегию цифровой трансформации наукоемких производств / Т.Н. Шушунова [и др.] // Транспортное дело России. 2022. № 1. С. 131–133.

2. Устич П.А., Иванов А.А., Мажидов Ф.А. Применение информационных технологий в системе технического обслуживания и ремонта вагонов // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 9 (255). С. 13–21.

3. Столяров А.Д., Файзуллина А.М., Абрамов В.И. Цифровая трансформация логистики предприятия с использованием цифровых двойников // Beneficium. 2024. № 2 (51). С. 23–31.

4. Экономика организации (предприятия): учеб. пособие для студентов вуза, обучающихся по направлениям подготовки 38.03.01 Экономика, 38.05.01 Экономическая безопасность / Т.К. Руткаускас [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. 260 с.

5. Ключин А.В. Цифровой двойник модели вагона. Основы концепции, подходы к реализации

и перспективы // Актуальные вопросы эксплуатации подвижного состава в современных условиях: материалы Международной студенческой научно-практической конференции (Нижний Новгород, 21 апреля 2021 года). Н. Новгород, 2022. С. 70–74.

6. Лакин И.К., Семенов А.П. Использование технологии «Цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 3 (63). С. 89–98.

7. Об установлении норм простоя пассажирских вагонов при техническом обслуживании, деповском и капитальном ремонте: указание МПС России от 23.12.1997 № В-1465у.

8. Плохих И.В. Оценка и анализ показателей готовности высокоскоростного поезда Velaro RUS («Сапсан») с учетом опыта России и Германии: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 217 с.

9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд., стереотип. М.: Наука, 1969. 576 с.

10. Программа оценки эффективности использования пассажирских вагонов на основе мониторинга и статистической обработки данных эксплуатации: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688607 Российская Федерация. № 2024686940 / Шинкарук А.С., Беспалько С.В., Иванов А.А.; заявл. 06.11.2024; опублик. 28.11.2024.

Дата поступления: 28.10.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

Контактная информация:

ИВАНОВ Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; wwx720@mail.ru

ШИНКАРУК Андрей Сергеевич — канд. техн. наук; Shinkarukas@mail.ru

ВИШНЯКОВ Иван Алексеевич — аспирант РУТ; Dalisan5555@gmail.com

A probability-based analysis of passenger car removal from operation for scheduled maintenance using digital twin modelling

A. A. Ivanov¹, A. S. Shinkaruk¹, I. A. Vishniakov²

¹Russian University of Transport, bldg. 1, 22 Novosuchevskaya str., Moscow, 127055, Russia

²Federal Passenger Company, Joint Stock Company, Moscow, 34 Masha Poryvayeva st., 107078, Russia

For citation: *Ivanov A. A., Shinkaruk A. S., Vishnyakova I. A.* A probability-based analysis of passenger car removal from operation for scheduled maintenance using digital twin modelling // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 27–40. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-27-40. (In Russian)

Abstract

Objective: one of the key areas of the economy's digital transformation is the deployment of technologies built around digital twins. Within the context, the present study explores an application of this technology to analyze the time a passenger railcar remains in an out-of-service fleet for scheduled maintenance. The duration of this period affects the total amount of unproductive rolling stock downtime and, consequently, the operational efficiency of the passenger service segment. The use of adaptive, self-configuring technologies together with mathematical representations of the time components that shape the process of withdrawing a passenger railcar from service to perform large-scale scheduled maintenance, including overhauls and depot-level repairs. This makes it possible to examine the repair-related interruption not as a single event, but as a sequence of interrelated stages. The paper considers the full period of removal from operational service. It starts when a passenger railcar is officially recorded in the information system as transferred to the inactive fleet and physically uncoupled from the train. It ends when, after completion of the scheduled repair, the railcar is returned to service and attached to the train. An additional task of the research is to establish the probability-based distribution patterns that characterize each component of this process. Identifying these regularities creates a basis for more grounded decisions concerning the planned use of repair resources at the enterprise. It also supports the calculation of the required size of the operating passenger-car fleet in relation to the daily timetable of the train-formation station, while improving the planning of repair-facility capacity for major scheduled work. The study presents a case study of how a digital twin can be employed to model and analyze the process of sending a passenger railcar for scheduled repair. **Method:** probability-based and statistical analysis. **Results:** the proposed method enables real-time planning and adjustment operational performance indicators for the effective use of the railcar fleet as statistical information accumulates, taking into account the potential force majeure events; it also allows modelling of stochastic departures from prescribed time norms in cases where such norms are established. **Practical significance:** from a practical standpoint, the study offers benefits for entities within the railcar maintenance sector. Additionally, the insights derived are highly relevant for a broad spectrum of stakeholders, such as rolling stock owners, freight and passenger carriers, and operators managing non-traction fleets.

Keywords: passenger railcar, large-scale scheduled repairs/overhauls, organization of withdrawing railcars from the operational services for scheduled maintenance, random variable, probability-based model, digital twin technology

References

1. Vliyanie obostreniya global'nykh vyzovov na strategiyu tsifrovoy transformatsii naukoemkikh proizvodstv / T.N. Shushunova [i dr.] // Transportnoe delo Rossii. 2022. No.1. S. 131–133. (In Russian)
2. Ustich P. A., Ivanov A. A., Mazhidov F. A. Primenenie informatsionnykh tekhnologij v sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta vagonov // Byulleten' transportnoj informatsii. 2016. No. 9 (255). S. 13–21. (In Russian)

3. Stolyarov, A. D., Fajzullina A. M., Abramov V.I. Tsifrovaya transformatsiya logistiki predpriyatiya s ispol'zovaniem tsifrovyykh dvoynikov // Beneficium. 2024. No.2 (51). S. 23–31. (In Russian)
4. Ekonomika organizatsii (predpriyatiya): ucheb. posobie dlya studentov vuza, obuchayushchihnya po napravleniyam podgotovki 38.03.01 Ekonomika, 38.05.01 Ekonomicheskaya bezopasnost' / T. K. Rutkauskas [i dr.]. 2-e izd., pererab. i dop. Ekaterinburg: Izd-vo UMC UPI, 2018. 260 s. (In Russian)
5. Klyushin A.V. Tsifrovoy dvoynik modeli vagona. Osnovy kontseptsii, podkhody k realizatsii i perspektivy // Aktual'nye voprosy ekspluatatsii podvizhnogo sostava v sovremennykh usloviyakh: materialy Mezhdunarodnoy studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Nizhnij Novgorod, 21 aprelya 2021 goda). N. Novgorod, 2022. S. 70–74. (In Russian)
6. Lakin I.K., Semenov A.P. Ispol'zovanie tekhnologii "Tsifrovoy dvoynik" pri upravlenii remontom lokomotivov // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2019. No. 3 (63). S. 89–98. (In Russian)
7. Ob ustanovlenii norm prostoya passazhirskikh vagonov pri tekhnicheskoy obsluzhivani, depovskom i kapital'nom remonte: ukazanie MPS Rossii ot 23.12.1997 no.V-1465u. (In Russian)
8. Plohih I.V. Ocenka i analiz pokazatelej gotovnosti vysokoskorostnogo poezda Velaro RUS ("Sapsan") s uchetom opyta Rossii i Germanii: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 2013. 217 s. (In Russian)
9. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostej. 4-e izd., stereotip. M.: Nauka, 1969. 576 c. (In Russian)
10. Programma ocenki effektivnosti ispol'zovaniya passazhirskikh vagonov na osnove monitoringa i statisticheskoy obrabotki dannykh ekspluatatsii: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM №2024688607 Rossijskaya Federaciya. No.2024686940 / Shinkaruk A.S., Bepal'ko S.V., Ivanov A.A.; zayavl. 06.11.2024; opubl. 28.11.2024. (In Russian)

Received: 28.10.2025

Accepted: 19.01.2026

Author's information:

Aleksander A. IVANOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; wwx720@mail.ru

Andrei S. SHINKARUK — PhD in Engineering;
Shinkarukas@mail.ru

Ivan A. VISHNYAKOV — Postgraduate Student RUT;
Dalisan5555@gmail.com

УДК 629.423.31

Модель термомеханических напряжений в зоне «изоляция — проводник» тяговых электродвигателей локомотивов

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Модель термомеханических напряжений в зоне «изоляция — проводник» тяговых электродвигателей локомотивов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 41–49. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-41-49

Аннотация

Цель: рассмотреть задачу повышения срока службы и надежности тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов; выполнить оценку влияния термомеханических напряжений на срок службы их изоляционного материала. **Методы:** основным методом исследования и расчета температурных полей выбрана теория теплопередачи в многослойных материалах и метод конечных элементов, выполненный в программном пакете SolidWorks. **Результаты:** итоги исследования показывают, что термомеханические напряжения играют значительную роль в процессе динамического термического старения системы изоляции обмоток ТЭД. Была разработана методика для численного исследования напряженно-деформированного состояния материала изоляции ТЭД на различных этапах статического и циклического нагружения. Установлено, что основным фактором, определяющим интенсивность старения изоляции, является влияние знакопеременных циклических термомеханических напряжений, а не термохимическое разрушение пропиточного состава. Получены аналитические выражения для оценки напряженно-деформированного состояния изоляции ТЭД, которые отличаются тем, что они требуют сравнительно небольшого объема исходных данных и позволяют выполнить прочностные расчеты с учетом особенностей системы электропривода. Разработана приближенная прогнозирующая модель для оценки межфазных термических напряжений в сборке материалов паза обмотки ТЭД. Материал изоляции считается линейно-эластичным при уровне деформации ниже предела текучести. Соединяемые компоненты можно рассматривать с точки зрения структурного анализа как удлиненные прямоугольные пластины, испытывающие линейные упругие деформации. **Практическая значимость:** результаты анализа могут быть использованы для оценки термомеханических напряжений в пропиточных материалах ТЭД и аналогичных им. Разработанные методы определения напряженного состояния изоляции ТЭД рекомендуются к практическому использованию.

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

Введение

Характерной чертой современных материалов, используемых при производстве тяговых электродвигателей (ТЭД) и разработанных в соответствии со стратегией предотвращения повреждений, является то, что

уровень их повреждения может либо оставаться постоянным, либо увеличиваться, но никогда не снижается самопроизвольно. Успешная приостановка и замедление роста усталостных трещин и расслоений достигаются с помощью постоянного совершенствования

изоляционных материалов и технологии изготовления ТЭД.

Если, несмотря на эти усилия, повреждение происходит, его распространение остается неопределенным, что снижает общую надежность и работоспособность изоляции ТЭД. В настоящее время все попытки текущего ремонта сосредоточены на заделке трещин, повторном нанесении защитного покрытия, восстановлении пропитки и замедлении образования трещин в результате механического воздействия. В итоге проводимые ремонтные мероприятия не всегда приводят к ожидаемому положительному результату. Перечисленные методы ремонта практически не эффективны для устранения невидимых микротрещин глубоко внутри изоляции ТЭД. Заживление может происходить посредством физических или химических процессов, которые в определенной степени постепенно устраняют внутренние дефекты и могут рассматриваться как процедуры, противоположные повреждению.

Чтобы правильно оценить долговечность изоляции тяговых электродвигателей, необходимо хорошее знание реакции материалов, из которых она состоит, на механические нагрузки и нагрузки окружающей среды. Это особенно верно в отношении участков изоляции ТЭД, которые расположены в местах, где осмотр и обслуживание затруднены, а чаще всего даже невозможны.

Обычно предполагается, что изоляционный материал подвержен только негативному воздействию термического окисления. Однако актуальные исследования показывают, что циклическое изменение нагрузки приводит к возникновению циклических изменений температуры в обмотках, что способствует возникновению значительного температурного градиента [1–3]. Температура медного проводника обычно существенно отличается от

температуры стального сердечника, что вызывает тепловое расширение элементов обмотки. Чем длиннее обмотка, тем больше общее расширение проводников. В результате возникают значительные деформации материала изоляции, особенно в осевом направлении [4].

К сожалению, основная физическая природа влияния скорости деформации на многослойные материалы до сих пор не совсем понятна. Этот недостаток знаний проистекает из многих сложностей их поведения, некоторые из которых перечислены ниже:

- неоднородный и анизотропный характер;
- большой выбор составляющих материалов;
- зависимость от времени реакция (вязкоупругость, старение, термическое или химическое разложение, кристаллизация, остаточное отверждение, поглощение влаги или растворителя);
- чувствительность параметров обработки (условия отверждения, пустоты, кристалличность, волнистость стеклоткани).

Поскольку механическое поведение изоляции ТЭД как многослойного материала зависит от скорости деформации, исследователи часто пытаются учесть влияние частоты при моделировании усталости. Более того, с практической точки зрения частота, с которой проводятся испытания на усталость, является одним из основных определяющих факторов продолжительности испытания.

Рассмотрим приближенную аналитическую модель для оценки межфазных напряжений в компонентах обмотки (сталь, изоляция и проводник), разработанную для случая эластичного пропиточного состава [7]. Термическая нагрузка может действовать как при нормальной эксплуатации многокомпонентных материалов, таких как обмотки тяговых электродвигателей, так и при их изготовлении, испытаниях или хранении [8].

Применение данной модели и внедрение соответствующих технологий и методов могут значительно повысить надежность и долговечность ТЭД-локомотивов, а также снизить эксплуатационные расходы и повысить общую эффективность железнодорожного транспорта.

Описание математической модели

В рамках исследования рассмотрим двухкомпонентную систему, состоящую из медного проводника и материала изоляции, как показано на рис. 1. В данной системе наблюдается периодическое изменение температуры на ΔT . Аналогичные процессы происходят в системе, включающей материал изоляции и стальной сердечник, что позволяет рассматривать их совместно.

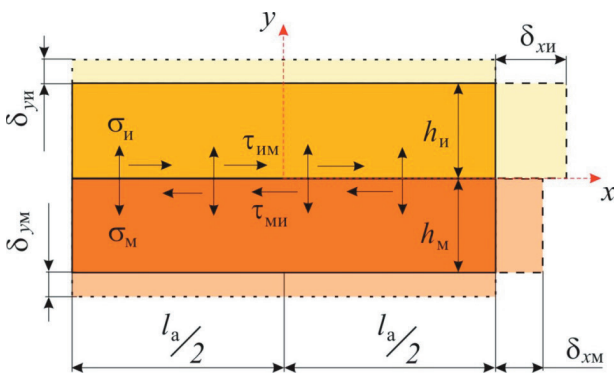


Рис. 1. Термомеханические напряжения и деформации при циклическом изменении температуры: σ_i — нормальное напряжение в изоляционном материале; σ_m — нормальное напряжение в медном проводнике; $\tau_{им}$ — касательное напряжение между изоляцией и медным проводником; $\tau_{ми}$ — касательное напряжение между медным проводником и изоляцией; h_i — толщина изоляции; h_m — толщина проводника; l_a — длина активной части обмотки; δ_{xi} — деформация материала изоляции по оси x ; δ_{xm} — деформация медного проводника по оси x ; δ_{yi} — деформация материала изоляции по оси y ; δ_{ym} — деформация медного проводника по оси y

Термические напряжения, возникающие как в медном проводнике, так и в стальном сердечнике, характеризуются незначительной величиной и не влияют на прочностные характеристики и долговечность тягового электродвигателя. В связи с этим сосредоточимся на детальном анализе напряженно-деформированного состояния исключительно материала изоляции.

Такой подход позволяет выделить и изучить ключевые факторы, влияющие на эксплуатационную надежность и долговечность системы, а также предоставляет более точные данные для проведения оценки и оптимизации конструкции тягового электродвигателя.

Для решения задачи необходимо установить два неизвестных межфазных напряжения в изоляционном материале (нормальное σ_i и касательное $\tau_{им}$) в таких условиях, чтобы перемещения нижней и верхней поверхностей его медного проводника совпадали.

В контексте циклической нагрузки в работе [8] представлены выражения для определения деформации материала как в продольном δ_{xm} , так и в поперечном δ_{yi} направлениях, что позволяет создать упрощенную модель:

$$\delta_{xi} = \frac{h_i K_i}{\mu_i} \tau_{им}, \quad \delta_{yi} = \frac{h_i H_i}{\nu_i} \sigma_i, \quad (1)$$

где h_i — толщина изоляции, м;
 μ_i — модуль сдвига изоляции, Па;
 ν_i, ν_m — коэффициент Пуассона изоляции и меди соответственно;
 K_i и H_i — постоянные коэффициенты.

В [9] утверждается, что при циклическом нагружении продольное межфазное смещение в конкретной точке определяется не только значением межфазного касательного напряжения сдвига, но и его второй производной в данной точке:

$$\delta_{xi} = \frac{h_i K_i}{\mu_i} \left[\tau_{им} - \alpha_{ци} \frac{d^2 \tau_{им}}{dx^2} \right], \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{ци}}$ — положительное число. Например, $\alpha_{\text{ци}} = h_{\text{и}}^2/3$ при $\mu_{\text{и}} = 0,3-0,35$ мПа.

Теперь выведем уравнения для межфазных касательных $\tau_{\text{им}}$ и нормальных $\sigma_{\text{им}}$ напряжений.

Так как температурные деформации материала изоляции в вертикальном направлении (ось y) δ_{yi} и медного проводника δ_{ym} по высоте паза относительно малы, будем считать, что:

$$\delta_{\text{yi}} = \delta_{\text{ym}}. \quad (3)$$

Равновесие изгибающих моментов, возникающих в материале изоляции ($J_{\text{и}}$) и медном проводнике ($J_{\text{м}}$), определится из следующих соотношений [10]:

$$J_{\text{и}} \frac{d^2 \delta_{\text{yi}}}{dx^2} - \frac{h_{\text{и}}}{2} \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \tau_{\text{им}} dx + \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \sigma_{\text{и}} dx dx = 0; \quad (4)$$

$$J_{\text{м}} \frac{d^2 \delta_{\text{ym}}}{dx^2} - \frac{h_{\text{м}}}{2} \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \tau_{\text{им}} dx - \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \sigma_{\text{м}} dx dx = 0,$$

где $J_{\text{и}} = \frac{E_{\text{и}} h_{\text{и}}^3}{12(1-\nu_{\text{и}}^2)}$ — приведенный момент

сечения изоляции, м⁴;

$t_i = \max \left(\frac{l_k^i}{\mathbf{v}_k} + \tau_k^i \right)$ — приведенный мо-

мент сечения проводника, м⁴;

$E_{\text{и}}, E_{\text{м}}$ — модуль упругости изоляции и меди соответственно, Па.

Для исключения интегралов из (4) продифференцируем его дважды:

$$J_{\text{и}} \frac{d^4 \delta_{\text{yi}}}{dx^4} - \frac{h_{\text{и}}}{2} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} + \sigma_{\text{и}} = 0,$$

$$J_{\text{м}} \frac{d^4 \delta_{\text{ym}}}{dx^4} - \frac{h_{\text{м}}}{2} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} - \sigma_{\text{м}} = 0. \quad (5)$$

Продольное смещение, возникающее под действием касательных напряжений в материале изоляции при условии незначительного влияния нормальных напряжений, то есть $\sigma_{\text{и}} = \sigma_{\text{м}} = 0$, может быть рассчитано с использованием следующего выражения:

$$\delta_{\text{xi}} = \alpha_{\text{и}} \Delta T + \lambda_{\text{и}} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} + \frac{h_{\text{и}}}{2} \delta_{\text{yi}} - \frac{h_{\text{и}}}{\mu_{\text{и}}} K_{\text{и}} \left[\tau_{\text{им}} - e_{\text{и}} \frac{d^2 \tau_{\text{им}}}{dx^2} \right] \quad (6)$$

и аналогично медного проводника:

$$\delta_{\text{xm}} = \alpha_{\text{м}} \Delta T + \lambda_{\text{м}} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} + \frac{h_{\text{м}}}{2} \delta_{\text{ym}} - \frac{h_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}}} K_{\text{м}} \left[\tau_{\text{им}} - e_{\text{м}} \frac{d^2 \tau_{\text{им}}}{dx^2} \right], \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{и}} = \frac{1-\nu_{\text{и}}^2}{h_{\text{и}} E_{\text{и}}}$ — постоянный коэффициент

для материала изоляции;

$\lambda_{\text{м}} = \frac{1-\nu_{\text{м}}^2}{h_{\text{м}} E_{\text{м}}}$ — постоянный коэффициент

для меди;

$e_{\text{и}}, e_{\text{м}}$ — податливость изоляции и меди соответственно, м/Па;

$\alpha_{\text{и}}, \alpha_{\text{м}}$ — коэффициенты теплового расширения изоляции и медного проводника, 1/°С.

В правой части уравнений (6) и (7) первые слагаемые описывают деформацию, обусловленную тепловым расширением. Вторые слагаемые связаны с деформацией от действия продольной силы. Третьи слагаемые соответствуют деформации, вызванной изгибом. Четвертые слагаемые представляют собой коррекцию деформации, обусловленную циклическим характером нагрузки.

В итоге получим следующее дифференциальное уравнение четвертого порядка для межфазного касательного напряжения сдвига:

$$(\alpha_{\text{м}} - \alpha_{\text{и}}) \Delta T = \left(\frac{h_{\text{и}}}{\mu_{\text{и}}} K_{\text{и}} + \frac{h_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}}} K_{\text{м}} \right) \frac{d^2 \tau_{\text{им}}}{dx^2} - \left(\frac{h_{\text{и}}}{\mu_{\text{и}}} K_{\text{и}} e_{\text{и}} + \frac{h_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}}} K_{\text{м}} e_{\text{м}} \right) \frac{d^4 \tau_{\text{им}}}{dx^4}, \quad (8)$$

где K_i — постоянный коэффициент,

$\mu_{и}, \mu_{м}$ — модули сдвига изоляции и медного проводника, Па.

С учетом граничных условий при $\tau_{им}(l_a/2) = 0$ можно записать:

$$\bar{\alpha}_{и} \Delta T = A_{и} \frac{d^2 \tau_{им}}{dx^2} - B_{и} \frac{d^4 \tau_{им}}{dx^2}, \quad (9)$$

где

$$\bar{\alpha}_{и} = \frac{\alpha_{м} - \alpha_{и}}{\left[(\lambda_{и} + \lambda_{м}) + \frac{\left(\frac{h_{и}}{2} + \frac{h_{м}}{2} \right)^2}{J_{м} + J_{и}} \right]}$$

— приведенный коэффициент теплового расширения изоляции, $1/^\circ\text{C}$

$$A_{и} = \frac{\frac{h_{и}}{\mu_{и}} K_{и} + \frac{h_{м}}{\mu_{м}} K_{м}}{\left[(\lambda_{и} + \lambda_{м}) + \frac{\left(\frac{h_{и}}{2} + \frac{h_{м}}{2} \right)^2}{J_{м} + J_{и}} \right]}$$

$$B_{и} = \frac{\frac{h_{и}^3}{\mu_{и}} K_{и} d_{и} + \frac{h_{м}^3}{\mu_{м}} K_{м} d_{м}}{\left[(\lambda_{и} + \lambda_{м}) + \frac{\left(\frac{h_{и}}{2} + \frac{h_{м}}{2} \right)^2}{J_{м} + J_{и}} \right]}$$

Общее решение (9) представляет собой линейную комбинацию произведений $\sinh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)$, $\sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)$, $\cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)$, $\cosh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)$ [9],

где

$$\rho_1^2 = \frac{A_{и}}{4B_{и}} + \frac{1}{2\sqrt{B_{и}}}; \quad \rho_2^2 = \frac{2\sqrt{B_{и}} - A_{и}}{4B_{и}}.$$

Решение уравнения (9) с учетом ограничений может быть получено следующим образом [10]:

$$\tau_{им} = C_1 \sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x) + C_2 \cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x), \quad (10)$$

где

$$C_1 = \frac{\alpha \Delta T \cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)}{O_{и}};$$

$$C_2 = \frac{-\alpha \Delta T \sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)}{O_{и}};$$

$$O_{и} = \rho_1 \sqrt{B_{и}} \sin(\rho_2 x) \cos(\rho_2 x) + \rho_2 \sqrt{B_{и}} \sinh(\rho_1 x) \cosh(\rho_1 x).$$

Описание касательных напряжений сдвига $\tau_{им}$, возникающих на границе раздела материалов, возможно при помощи формулы (11), которая является результатом решения уравнения (9):

$$\tau_{им} = \bar{\alpha}_{и} \Delta T \left[\frac{\cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x) \sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)}{O_{и}} - \frac{\sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x) \cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)}{O_{и}} \right]. \quad (11)$$

Данная формула позволяет точно и эффективно рассчитывать касательные напряжения сдвига $\tau_{им}$, что является важным аспектом в контексте нашей работы.

Тепловое напряжение в соединительном слое определяется разницей коэффициентов теплового расширения между слоями и изменением температуры. Контрольной точкой для изменения температуры является момент, когда материал не испытывает напряжений сжатия. Тепловое напряжение возрастает при увеличении толщины либо модуля упругости медного проводника и изоляции. При уменьшении толщины соединительного слоя оно снижается.

В частности, максимальное касательное напряжение межфазного сдвига $\tau_{им\max}$ достигается в точке $x = l_a/2$. Предлагаемую модель можно рассматривать как имеющую фиксированное граничное условие по краям в осевом направлении.

Результаты вычислений

В рамках данного аналитического исследования была создана конечно-элементная модель в программном пакете SolidWorks, которая позволяет оценить касательные напряжения, возникающие в обмотке ТЭД локомотива.

Результаты моделирования касательных напряжений при изменении температуры $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ показаны на рис. 2. В отличие от механической усталости, температурный диапазон ΔT , который используется как независимая переменная, варьируется в зависимости от полигона эксплуатации локомотивов на железных дорогах РФ. Но не только температурный диапазон ΔT имеет решающее значение при оценке работоспособности материалов изоляции ТЭД, также большое влияние оказывает тепловой цикл в реальном времени.

В процессе исследования моделей, подверженных сжимающим и сдвигающим нагрузкам, было установлено, что разрушение образцов будет происходить не по центру, а в области, где наблюдается локальная концентрация напряжений сдвига. Около 60% ма-

териала изоляции в середине паза не подвергается термическому напряжению. Воздействию тепловой нагрузки подвержен только участок шириной 60–80 мм с каждой наружной стороны обмотки. Наиболее критическими для изоляции являются изгибающие напряжения, возникающие в лобовой части обмотки. Они могут привести к остаточным деформациям и повреждениям в местах выхода проводников из пазов.

Даже если уровень напряжений в материале изоляции значительно ниже предела упругости, в условиях непрерывного циклического нагружения возникают микроскопические повреждения. Эти микрповреждения накапливаются по всему объему материала изоляции и могут завершиться образованием трещин и их последующим ростом до размеров, вызывающих окончательное его разрушение после определенного количества циклов напряжений или деформаций, и инициировать крупномасштабные повреждения, приводящие к окончательному выходу ТЭД из строя. Проявление усталостного разрушения материала изоляции

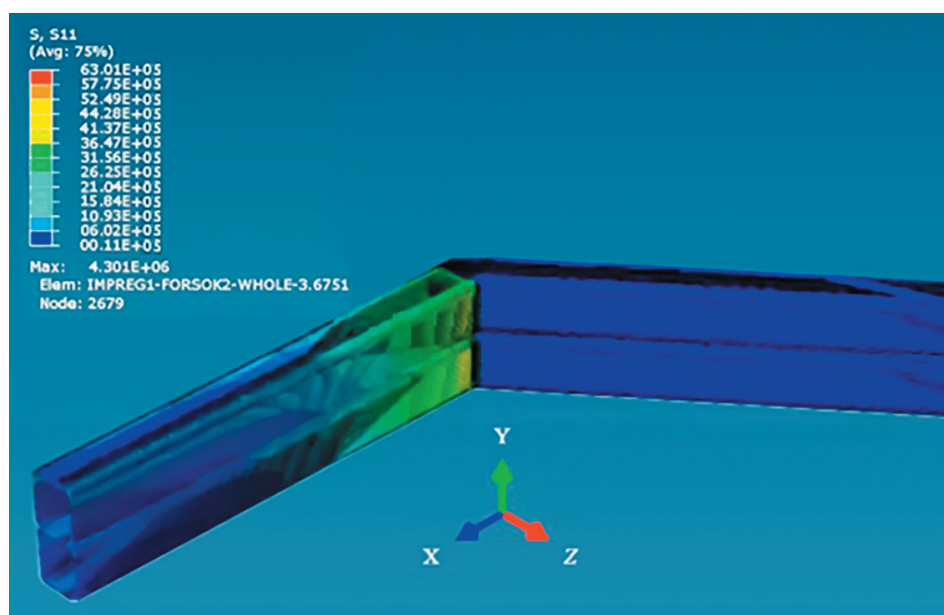


Рис. 2. Результаты моделирования касательных напряжений вдоль оси паза ТЭД

ТЭД часто происходит внезапно, без внешнего предупреждения. Однако вовлеченные механизмы разрушения материала изоляции ТЭД и подготовка условий для отказа могли скрытно работать с самого начала периода эксплуатации. Процесс накопления сопутствующих отказу показателей происходит преимущественно в определенных локальных областях материала изоляции ТЭД и неоднородно по всему ее объему. Эти уязвимые области могут иметь высокие локальные концентрации деформаций или напряжений, вызванные резкими изменениями геометрии обмотки, несовершенством материала изоляции или особыми условиями эксплуатации ТЭД.

Также с использованием аналитической модели был выполнен расчет максимального касательного напряжения сдвига по выражению (11). Результаты данного расчета приведены на рис. 3.

Результаты вычислений на основе выражения (11) показывают, что максимальные касательные напряжения $\tau_{\text{иммакс}}$ прямо пропорциональны разнице между коэффициентами

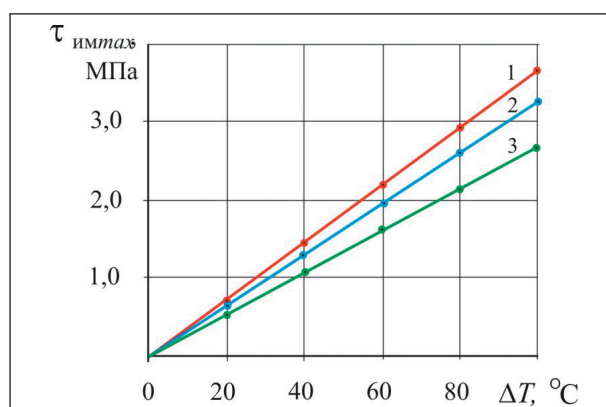


Рис. 3. Зависимость изменения максимального касательного напряжения в материале изоляции от изменения температуры ΔT при различных значениях модуля упругости изоляции: 1 — исходное состояние; 2 — уменьшено значение модуля упругости на 10%; 3 — уменьшено значение модуля упругости на 20%

теплового расширения для двух смежных слоев ($\alpha_{\text{и}} - \alpha_{\text{м}}$), изменению температуры ΔT и модулю упругости материала изоляции $E_{\text{и}}$. Максимальная погрешность расчета составляет 5,6%.

Выводы

Выявление первопричин и понимание процесса старения и отказа изоляции — одна из важных предпосылок при разработке более надежной конструкции ТЭД. Другими словами, правильное определение первопричин старения изоляции может быть важным фактором, позволяющим проектировать высоконадежные и эффективные тяговые электрические машины. Кроме того, понимание механизмов разрушения изоляции позволит использовать различные подходы к мониторингу технического состояния, тем самым увеличивая точность количественной оценки надежности работы и срока службы ТЭД локомотивов. С инженерной точки зрения важно прогнозировать механические и немеханические напряжения, влияющие на возникновение и развитие повреждений в материале изоляции. В изоляции ТЭД как в многослойном полимерном композитном материале чаще всего напряжения возникают из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения стали, меди и материала изоляции при изменении температуры обмотки, химической усадки пропиточного состава при его полимеризации и неравномерного отверждения, поглощения влаги.

Проведенное исследование подтверждает надежность и точность метода аналитических расчетов, а также эффективность использования программного обеспечения SolidWorks для моделирования механических напряжений в изоляции ТЭД.

Эти результаты могут быть полезны для дальнейшего анализа и разработки методов снижения напряжений в материале изоляции.

Список источников

1. Исмаилов Ш. К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава: монография. Омск, 2007. 391 с.

2. Шрайбер М. А. Конечно-элементное моделирование тепловых процессов асинхронного тягового электродвигателя // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: мат-лы I Международной научно-технической конференции (Ташкент, 20–23 апреля 2022 г.). Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2022. С. 203–208.

3. Модель теплового потока обмотки статора асинхронного тягового электродвигателя / В. В. Грачев и др. // Электротехника. 2022. № 2. С. 36–39.

4. Грищенко А. В., Шрайбер М. А. Термомеханические напряжения в изоляции тяговых электрических машин тепловозов // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сб. ст. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. С. 107–109.

5. Кьюнг Л. К., Лурье С. А., Дудченко А. А. Об оценке трещиностойкости при межслойном раз-

рушении слоистых композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18, № 1. 2012. С. 83–91.

6. Дудкин А. Н., Ким В. С., Марьин С. С. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 7. С. 171–174.

7. Suhir E. Stresses in Bi-Metal Thermostats // Journal of Applied Mechanics. 1986. No. 53 (3). P. 657–660.

8. Suhir E. Interfacial Stresses in Bimetal Thermostat // Journal of Applied Mechanics. 1989. No. 56 (3). Pp. 595–600.

9. Bert C. W. Bending of Plates on Thin Compressible Foundations // Journal of Applied Mechanics. 1994. No. 61 (2). Pp. 477–499.

Дата поступления: 11.11.2025

Решение о публикации: 23.02.2026

Контактная информация:

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

A model of thermal-mechanical stresses in the insulation-conductor zone of locomotive traction electric motors

M. A. Shrajber

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

For citation: *Shrajber M. A. A model of thermal-mechanical stresses in the insulation-conductor zone of locomotive traction electric motors // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 41–49. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-41-49. (In Russian)*

Abstract

Objective: to investigate the issue of enhancing the service life and reliability of locomotives' traction electric motors (TEM). To evaluate the effect of thermomechanical stress on lifespan of their insulation materials. **Methods:** the main methods of studying and calculating temperature fields are the theory of heat transfer in multilayer materials and the finite element method, implemented in the SolidWorks software package. **Results:** the research results have demonstrated that thermal-mechanical stresses play a significant role in the dynamic thermal aging of the TEM winding insulation system. A methodology for numerical

investigation of the stress-strain state of the TEM insulation material at various stages of static and cyclic loading has been developed. The study has established that the main factor determining the intensity of insulation aging is the influence of alternating cyclic thermomechanical stresses, rather than thermochemical degradation of the impregnation composition. Analytical expressions have been obtained to assess the stress-strain state of TEM insulation. These expressions vary in that they require comparatively less initial data and enable strength calculations that account for specific features of the electric drive system. An approximate predictive model has been developed to assess interfacial thermal stresses in the assembly of TEM slot-winding materials. The insulating material is assumed to behave as a linear-elastic medium at strain levels below the yield point. From a structural-analysis perspective, the bonded components can be modelled as elongated rectangular plates subjected to linear elastic deformations. **Practical significance:** the results of the analysis can be used to evaluate thermomechanical stresses in impregnation materials of traction motors and analogous systems. The developed techniques for assessing the stress state of TEM insulation can be recommended for practical application.

Keywords: locomotive's traction electric motor, thermal processes in electric machines, insulation aging, thermal-mechanical stresses, reliability of locomotive electric machines

References

1. Ismailov Sh.K. Povyshenie resursa izolyatsii elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava: monografiya. Omsk, 2007. 391 s. (In Russian)
2. Shrajber M.A. Konechno-elementnoe modelirovanie teplovykh protsessov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya // Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav: problemy, resheniya, perspektivy: mat-ly I Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Tashkent, 20–23 aprelya 2022 g.). Tashkent: Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet, 2022. S. 203–208. (In Russian)
3. Model' teplovogo potoka obmotki statora asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya / V.V. Grachev i dr. // Elektrotehnika. 2022. No. 2. S. 36–39. ISSN 0013-5860. (In Russian)
4. Grishchenko A.V., Shrajber M.A. Termomekhanicheskie napryazheniya v izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin teplovozov // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sb. st. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2021. S. 107–109. (In Russian)
5. K'yung L.K., Lur'e S.A., Dudchenko A.A. Ob otsenke treshchinostojkosti pri mezhslonnom razrushenii sloistykh kompozitov // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksij. 2012. T. 18, no. 1. 2012. S. 83–91. (In Russian)
6. Dudkin A.N., Kim V.S., Mar'in S. S. Issledovanie vnutrennikh mekhanicheskikh napryazhenij v propitochnykh i zalivochnykh lakakh // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2005. T. 308, no. 7. S. 171–174. (In Russian)
7. Suhir E. Stresses in Bi-Metal Thermostats // Journal of Applied Mechanics. 1986. No. 53 (3). Pp. 657–660.
8. Suhir E. Interfacial Stresses in Bimetal Thermostat // Journal of Applied Mechanics. 1989. No. 56 (3). Pp. 595–600.
9. Bert C.W. Bending of Plates on Thin Compressible Foundations // Journal of Applied Mechanics. 1994. No. 61 (2). Pp. 477–499.

Received: 11.11.2025

Accepted: 23.02.2026

Author's information:

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

УДК 656.07:004.896

Гибридная многокритериально-имитационная модель структурных элементов зеленых цепей поставок

П. Н. Мишкuroв, Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Для цитирования: Мишкuroв П. Н., Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н., Корнилов С. Н. Гибридная многокритериально-имитационная модель структурных элементов зеленых цепей поставок // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 50–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-50-61

Аннотация

Цель: разработка гибридной многокритериально-имитационной модели зеленой цепи поставок для выбора рациональной комбинации инструментов зеленой логистики. **Методы:** выполнен анализ существующих подходов к комбинированию многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием и линейным программированием. Изучена возможность использования многокритериально-имитационных моделей для описания динамических зависимостей между индикаторами зеленой цепи поставок, параметрами и показателями материальных потоков, инструментами зеленой логистики. Основным недостатком существующих комбинированных моделей является выбор инструментов зеленой логистики без комплексной оценки как индикаторов устойчивости, специфичных для каждого структурного элемента зеленых цепей поставок, так и ограничений на логистические ресурсы. Разработка единого подхода к комбинированию методов многокритериального анализа, оптимизации и имитационных моделей является актуальной задачей, решение которой позволит повысить устойчивость зеленых цепей поставок. **Результаты:** предложен подход к комбинированию методов многокритериального анализа, линейного программирования и имитационного моделирования. **Практическая значимость:** использование предложенной в работе модели позволяет реализовать многокритериальное принятие решений по выбору и реализации эффективных инструментов зеленой логистики в цепи поставок.

Ключевые слова: устойчивое развитие, зеленая логистика, цепь поставок, гибридная модель, многокритериальный анализ, имитационная модель, оптимизация

* Исследование выполнено за счет грантов Российского научного фонда:

№ 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>,

№ 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.

Введение

Задачи управления зелеными цепями поставок (ЗЦП) являются наиболее сложными в логистике. Сложность таких задач обусловлена многовариантностью управленческих решений и неопределенностью множества факторов оценки эффективности таких решений

в условиях согласованного достижения экономических, социальных и экологических целей функционирования цепей поставок. В результате оперативным и административным руководителям сложнее принимать управленческие решения по повышению устойчивости зеленых цепей поставок [1].

Для оценки эффективности функционирования ЗЦП используются как одиночные, так и комбинированные методы. Основой таких методов являются экономические, экологические и социальные показатели цепей поставок и их элементов, например, величина издержек, уровни рисков, целевые показатели экономики замкнутого цикла и множество других [2]. Достижение каждого показателя зависит от качества принимаемых решений по реализации инструментов зеленой логистики (ЗЛ) [3]. Однако для достижения целей устойчивого развития многокритериальность и многовариантность реализации отдельного инструмента ЗЛ повышает требования к качеству оценки состояния как отдельных элементов цепи поставок, так и цепи в целом. С другой стороны, высокая динамика расхода логистических ресурсов, сложность структуры материальных потоков и многовариантность их переработки определяют ограничения задачи поиска оптимального управленческого решения по реализации инструментов ЗЛ.

Возрастает актуальность разработки новых моделей поддержки принятия решений по повышению устойчивости цепей поставок [4]. Усиливается интерес исследователей к анализу и оценке устойчивости цепей поставок на основе комплексного использования методов анализа, прогнозирования и оптимизации материальных потоков, например комбинирования методов многокритериального анализа с математическими методами [5]. Использование таких методов при решении задач многокритериального анализа позволило определять расходы и количество ресурсов на реализацию инструментов зеленой логистики в виде серых чисел, а также формировать комплекс инструментов ЗЛ для их реализации в цепи поставок [3]. Для повышения точности прогнозирования параметров и показателей материальных

потоков используются имитационные модели [6], результатом которых являются управленческие решения по повышению устойчивости цепей поставок.

Инструменты имитационного моделирования обладают необходимым потенциалом для создания высокоточных моделей цепей поставок [7]. Сложность моделирования зеленых цепей поставок (ЗЦП) связана с динамичностью, неопределенностью и многофакторностью среды их функционирования, а также с многокритериальностью задач. Эффективное моделирование ЗЦП должно адекватно отражать сложность их функционирования. Для этого требуется комплексное использование методов анализа, прогнозирования и оптимизации цепей поставок. Перспективным направлением является комбинирование многокритериальных методов с имитационными моделями, методами математического программирования и современными цифровыми и интеллектуальными технологиями [6].

Основными задачами настоящего исследования являются:

1. Разработка гибридных моделей на основе комплексного использования имитационного моделирования с методами многокритериального анализа. Для повышения точности моделирования ЗЦП необходимо совмещать разные подходы (например, системную динамику, агентное и дискретно-событийное моделирование) в рамках одной модели элементов ЗЦП. Решение данной задачи позволит расширить возможности использования многокритериальных методов принятия решений на основе использования комбинированных имитационных моделей элементов ЗЦП.

2. Интеграция критериев устойчивости в имитационные модели. Задача заключается в корректном определении баланса

экономической, экологической и социальной устойчивости ЗЦП. Потенциально данная задача решается на основе формализованного описания индикаторов ЗЦП, параметров и показателей материальных потоков в имитационных моделях элементов цепей [6].

Литературный обзор

Обзор и анализ моделей цепей поставок [6] позволяют говорить об интеграции аспектов устойчивого развития в практику управления цепями поставок. В управлении цепями поставок применяются математические, имитационные, многокритериальные методы принятия решений. В зависимости от целей исследования используются различные комбинации методов и моделей ЗЦП (табл. 1). Такие модели по-разному учитывают функциональную сложность ЗЦП.

Перспективным направлением развития моделей ЗЦП является комбинация различных типов моделей с имитационным моделированием, что позволит учитывать функциональную сложность цепей поставок и ее структурных элементов, многофакторность, динамичность и неопределенность внешней и внутренней среды, сложность структуры материальных потоков.

Примерами построения имитационных моделей ЗЦП являются системно-динамические [8], дискретно-событийные [9], агентные имитационные модели [10] и модели, построенные на основе использования геоинформационных систем [11]. Наблюдается повышенный интерес исследователей к многопроходному моделированию ЗЦП. Основой таких моделей являются комбинирование многокритериального анализа и системной динамики [12]; комплексное использование методов оптимизации сложных систем и агентное моделирование [13], дискретно-событийного моделирования

и системной динамики [14], дискретно-событийного и агентного моделирования [15].

Использование системно-динамического подхода позволило целостно исследовать влияние экономических и экологических факторов [16, 17]. Системно-динамические имитационные модели описывают сложные нелинейные динамические зависимости [18]. Использование дискретно-событийного подхода позволило не только повысить точность моделирования технологии переработки материальных потоков в элементах цепи поставок [19], но и описать зависимости вариантов данной технологии от экономических, социальных и экологических факторов [10, 11].

Агентные имитационные модели ЗЦП используются в основном для гибкого описания взаимодействий между ее участниками [20], при оценке жизненного цикла цепей поставок или определении их экологической, социальной, эколого-экономической устойчивости [21].

Выбор подхода к построению имитационных моделей структурных элементов ЗЦП и способов интеграции математических методов принятия решений определяется конкретными целями исследования [22]. В основном комбинированные имитационные модели применяются для описания ключевых экономических параметров цепей поставок. В таких моделях значения экономических параметров определяются с помощью методов оптимизации [12, 13]. Результатом комплексного использования имитационных и оптимизационных моделей является повышение точности прогнозов значений параметров материальных потоков как на стратегическом [14], так и на тактическом [15] уровне управления.

Основным недостатком существующих гибридных моделей является выбор инструментов зеленой логистики без комплексной

ТАБЛИЦА 1. Краткая характеристика существующих моделей управления зелеными целями поставок

Тип модели	Подходы и методы моделирования	Уровни управления	Краткое описание модели	Результат
Математические модели	Одноцелевые	Стратегический	Точность исходных данных, оптимизация по одному критерию	Оптимальные значения параметров материальных потоков или элементов цепей поставок по одному критерию
	Многоцелевые	Стратегический	Точность исходных данных, математическое описание баланса конфликтующих критериев	Оптимальные значения параметров материальных потоков или элементов цепей поставок по нескольким критериям
Многокритериальные модели принятия решений (MCDM)	Принятие решений по множеству атрибутов (MADM)	Стратегический и тактический	Точные атрибуты, альтернативы предопределены, малое количество альтернатив	Ранжирование и сортировка решений (альтернатив), выбор наилучшей альтернативы из множества
	Многоцелевое принятие решений (MODM)	Стратегический, тактический, оперативный	Неточные атрибуты, альтернативы не предопределены, большое (бесконечное) количество альтернатив	Определение оптимальной альтернативы с учетом ограничений и нескольких целей
Имитационные модели	Одноподходные	Стратегический	Динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, точное описание технологии переработки материальных потоков	Варианты значений параметров материальных потоков или элементов цепей поставок
	Многоподходные	Тактический и оперативный	Динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, взаимодействие элементов материальных потоков сложной структуры	Варианты значений параметров материальных потоков или элементов цепей поставок
Комбинированные	Имитационные и оптимизационные	Тактический	Точность исходных данных, динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, взаимное взаимодействие элементов материальных потоков сложной структуры, оптимизация по одному критерию	Оптимальные значения параметров материальных потоков или элементов цепей поставок по одному критерию
	Многокритериальные и оптимизационные	Стратегический и тактический	Неопределенность исходных данных, многовариантность значений параметров материальных потоков, многофакторность	Набор альтернатив комплексного использования инструментов ЗЛ, оптимальное значение параметров инструментов по одному критерию эффективности
	Многокритериальные и имитационные	Оперативный, тактический и стратегический	Динамичность использования логистических ресурсов, многофакторность, точное описание технологии переработки материальных потоков, многовариантность баланса конфликтующих критериев	Оптимальные значения параметров инструмента ЗЛ и материальных потоков по нескольким критериям

оценки как индикаторов устойчивости, специфичных для каждого структурного элемента ЗЦП, так и ограничений на логистические ресурсы.

В связи с этим разработана универсальная методика формирования гибридных моделей структурных элементов ЗЦП на основе комплексного использования многокритериальных методов принятия решений с имитационным моделированием и методами оптимизации материальных потоков является актуальной задачей, решение которой позволит повысить экономическую, социальную и экологическую эффективность ЗЦП.

Гибридная многокритериально-имитационная модель структурных элементов зеленых цепей поставок

Цепи поставок являются частью глобальных логистических транспортных систем. Такие системы представляют линейно упорядоченную совокупность элементов вдоль материального и сопутствующих ему информационному, финансовому потокам и потоку услуг. Транспортный, накопительный, перерабатывающий, входной и выходной элементы цепи поставок выполняют функции по переработке и продвижению материальных потоков. Управляющий элемент логистической цепи координирует функционирование всех ее элементов, контролирует выполнение функций и операций в элементах цепи, а также обеспечивает информационную и финансовую связь между ними [23].

В процессе функционирования элементы цепи поставок являются загрязнителями окружающей среды, а также потребителями логистических ресурсов (материальных, финансовых, информационных ресурсов и услуг), количество которых ограничено. Повышение устойчивости функционирования ЗЦП

достигается при комплексном использовании инструментов ЗЛ. Инструмент ЗЛ является способом воздействия на элементы и логистические потоки с целью изменения их параметров для повышения экономической, экологической и социальной устойчивости ЗЦП [3].

Одной из основных задач управляющего элемента ЗЦП является выбор комплекса инструментов ЗЛ в зависимости от сложности и загруженности инфраструктуры, используемых технологий, организации взаимодействия структурных элементов ЗЦП, показателей экономической эффективности, экологического воздействия на окружающую среду, геополитических и санкционных ограничений, параметров и показателей материальных потоков. Данные индикаторы устойчивости ЗЦП объединены в группы: инфраструктурные, организационно-технологические, экономические, социальные, экологические, политические, потоковые [6]. Сложность оценки комплексного использования инструментов ЗЛ обусловлена многовариантностью реализации каждого инструмента ЗЛ.

Функционал управляющего элемента ЗЦП предлагается моделировать на основе использования разработанной гибридной многокритериальной имитационной модели (рис. 1). Предлагаемая модель представляет собой трехуровневую комбинацию многокритериальных методов принятия решений с имитационными моделями.

На первом уровне применяются методы многокритериального анализа структурных элементов ЗЦП, инструментов ЗЛ, критериев устойчивости ЗЦП и показателей материальных потоков. Результатом многокритериального анализа являются значения весовых коэффициентов инструментов ЗЛ, показателей материальных потоков, значимости элементов ЗЦП и коэффициенты значимости

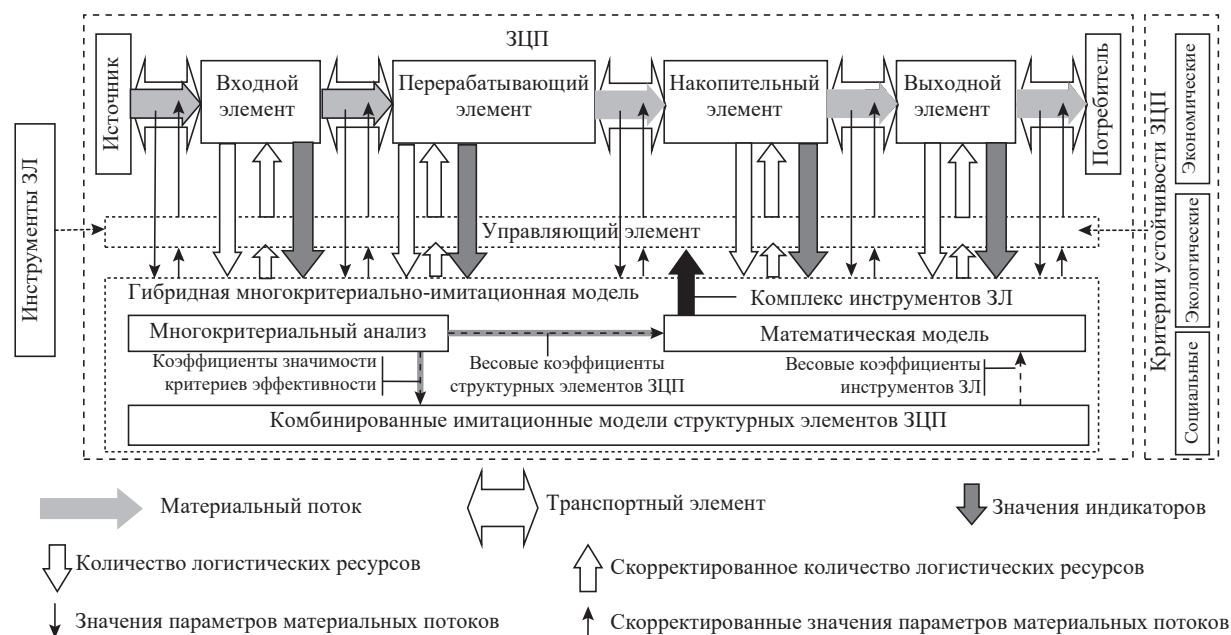


Рис. 1. Схема гибридной многокритериально-имитационной модели структурных элементов зеленых цепей поставок

экономического, экологического и социального критериев устойчивости ЗЦП.

На втором уровне оценивается использование логистических ресурсов при реализации инструментов ЗЛ для каждого элемента ЗЦП путем комбинирования имитационного моделирования и методов оптимизации. Результатами оценки являются скорректированные весовые коэффициенты инструментов ЗЛ в элементах ЗЦП. Данные коэффициенты определяются для условий высокой динамики переработки материальных потоков и интенсивности использования логистических ресурсов.

Оценка совокупного эффекта от реализации комплекса инструментов ЗЛ выполняется на третьем уровне разработанной гибридной модели. Достижимый эффект применения комплекса инструментов ЗЛ определяется на основе использования разработанной в работе [3] математической модели. Исходными данными модели являются результаты многокритериаль-

ного анализа, проведенного на первом уровне разработанной гибридной модели, и комбинированных имитационных моделей. В итоге определяются набор инструментов ЗЛ и совокупный потенциальный эффект от их комплексного использования в элементах ЗЦП.

Многокритериальный анализ ЗЦП

Функционал управляющего элемента ЗЦП состоит из широкого круга задач, одной из которых является формирование и оценка вариантов реализации инструментов ЗЛ для достижения целей устойчивого развития с учетом значений индикаторов устойчивости ЗЦП. Важным этапом при формировании комплекса инструментов ЗЛ является многокритериальный анализ ЗЦП.

Данный этап обосновывается различной важностью как структурных элементов, критериев эффективности функционирования ЗЦП и показателей материальных потоков,

так и инструментов ЗЛ. Важность каждого из представленных элементов определяется на основе их ранжирования дискретными методами многокритериального анализа [3]. Результатом ранжирования являются коэффициенты значимости каждого элемента цепи, критерия устойчивости ЗЦП, показателя материального потока и инструмента ЗЛ. Коэффициенты служат исходными данными к математической модели выбора инструментов ЗЛ [3]. Однако использование субъективных экспертных оценок является основным недостатком дискретных методов многокритериального анализа, что приводит к ограничению точности выбора управленческих решений. Для повышения точности предлагается при определении весовых коэффициентов инструментов ЗЛ использовать метод имитационного моделирования.

Комбинированные имитационные модели элементов ЗЦП

Реализация инструмента ЗЛ сопровождается изменениями расхода логистических ресурсов при переработке материальных потоков в элементе ЗЦП. Динамические зависимости расхода логистических ресурсов от параметров материальных потоков и технологии их переработки в элементах ЗЦП определяют необходимость использования метода имитационного моделирования.

Для повышения точности определения оптимальных значений представленных параметров предлагается комбинировать имитационные модели структурных элементов ЗЦП и методы оптимизации. Основой данного подхода является способ описания технологии переработки материальных потоков и модели многоцелевой оптимизации параметров инструментов ЗЛ.

Технологические процессы структурных элементов ЗЦП, связанные с переработкой

материальных потоков, являются дискретными. Каждый процесс представляет собой последовательность технологических операций, которые начинаются и заканчиваются в определенных моменты времени. Для моделирования порядка этих операций применяется дискретно-событийный (процессный) подход [14]. Результатом использования процессного подхода является последовательность элементов модели, которая определяет фактическую технологию переработки материальных потоков. Плановые или случайные события, возникающие в определенные моменты времени, задают изменения параметров потоков и расхода ресурсов. В случае изменений порядка выполнения технологических операций последовательности элементов модели корректируются [24], что ограничивает универсальность использования имитационных моделей для оценки множества управленческих решений.

Разработан универсальный способ моделирования технологии переработки материальных потоков на основе использования агентного (объектно-ориентированного) подхода в имитационных моделях элементов ЗЦП. Результатом использования данного подхода является выделение в виде взаимосвязанных агентов управляющего объекта (диспетчера), отдельной технологической операции, элемента материального потока и ресурса. Структура агентов состоит из параметров, переменных и алгоритмов их корректировки, а также из списков взаимосвязанных агентов. Это позволяет выделить отдельного агента, который обладает своим поведением и характеристиками. Технология переработки материальных потоков в структурном элементе ЗЦП описывается статической последовательностью стандартных действий технологического процесса, в котором перерабатываются элементы материального потока. При планировании

изменений технологии работы элемента ЗЦП необходимо учитывать состояние каждого ресурса и материального потока. Поэтому порядок технологических операций моделируется динамическим списком агентов и алгоритмами его корректировки. Расход логистического ресурса задается для отдельной технологической операции.

Для реализации методов оптимизации в имитационной модели необходимо увязать сложную структуру взаимосвязей агентов с параметрами оптимизации и целевой функцией. Нужно установить обратные связи между параметрами оптимизации и результатами корректировок расхода логистических ресурсов на переработку материальных потоков и реализацию инструментов ЗЛ. Формализовать параметры оптимизации и целевую функцию предлагается на основе использования элементов системной динамики. Преимуществом системно-динамического подхода к построению имитационных моделей является способ описания структуры связей между элементами системы на основе использования динамических переменных и обратных связей. Динамические переменные и обратные связи являются одними из базовых объектов системной динамики, использование которых позволит настроить целевую функцию оптимизации.

Критерии устойчивости описываются динамическими переменными, значения которых зависят от величины расхода логистических ресурсов, параметров материальных потоков и технологических процессов. Целевая функция (V) описывается суммой произведений динамических переменных и коэффициентов значимости экономического, экологического и социального критериев устойчивости (см. формулу 1). Коэффициенты значимости критериев устойчивости для отдельного структурного элемента ЗЦП определяются по результа-

там многокритериального анализа на первом уровне разработанной гибридной многокритериально-имитационной модели.

$$V = 1 - \left(\frac{k_{\text{э}} \cdot J_{\text{э}}}{a_{\text{э}}} + \frac{k_{\text{экол}} \frac{1}{J_{\text{экол}}}}{a_{\text{экол}}} + \frac{k_{\text{соц}} \cdot J_{\text{соц}}}{a_{\text{соц}}} \right) \rightarrow \max, (1)$$

где V — весовой коэффициент ЗЛ;

$k_{\text{э}}, k_{\text{экол}}, k_{\text{соц}}$ — значимость экономического, экологического и социального критериев устойчивости, соответственно;

$J_{\text{э}}, J_{\text{экол}}, J_{\text{соц}}$ — экономический, экологический и социальный критерии устойчивости функционирования элемента ЗЦП при реализации инструмента ЗЛ;

$a_{\text{э}}, a_{\text{экол}}, a_{\text{соц}}$ — переводные коэффициенты критериев устойчивости в безразмерную величину, которые определяются экспертной оценкой результатов экспериментов на комбинированных имитационных моделях.

Результатом использования комбинированной имитационной модели является скорректированное значение весового коэффициента инструмента ЗЛ с учетом потенциального экономического, экологического и социального эффекта от его реализации в элементе ЗЦП при рациональном использовании логистических ресурсов как на реализацию инструмента ЗЛ (V), так и на переработку материальных потоков.

Оценка реализации комплекса инструментов ЗЛ

Оценка совокупного эффекта от реализации комплекса инструментов ЗЛ выполняется на основе использования математической модели, разработанной в работе [3]. Оптимальная комбинация инструментов ЗЛ, которые необходимо реализовать в структурных элементах ЗЦП при имеющихся логистических ресурсах,

определяется математической моделью. Исходными данными математической модели являются результаты первого и второго уровня разработанной гибридной многокритериально-имитационной модели. Целевая функция оценки совокупного эффекта от реализации комплекса инструментов ЗЛ выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \sum_{j=1}^m (V_{ij} \cdot x_{ij}) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где x_{ij} — применение в i -м элементе ЗЦП j -го инструмента ЗЛ (если инструмент ЗЛ не применяется, $x_{ij} = 0$; если инструмент ЗЛ применяется, $x_{ij} = 1$ [3]);

ω_i — значимость i -го элемента ЗЦП, безразмерная величина, измеряемая в долях единицы, $i = 1, 2, \dots, n$;

V_{ij} — весовой коэффициент j -го инструмента ЗЛ, полученный на втором уровне разработанной гибридной модели, на основе оценки потенциального эффекта от его реализации в i -м элементе ЗЦП, $j = 1, 2, \dots, m$;

n — количество элементов ЗЦП;

m — количество инструментов ЗЛ.

Заключение

Предложен подход к формированию гибридных многокритериально-имитационных моделей структурных элементов ЗЦП, основанный на комплексном использовании метода имитационного моделирования с многокритериальными методами оценки управленческих решений для выбора эффективного варианта реализации комплекса инструментов ЗЛ в структурных элементах ЗЦП.

Численные эксперименты на разработанной модели, результаты которых будут представлены во второй части настоящей статьи, показали возможность устанавливать реалистичный набор инструментов зеленой

логистики в условиях ограниченных логистических ресурсов и обеспечивать развитие зеленых цепей поставок для достижения целей экономической, социальной и экологической устойчивости.

Список источников

1. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2023. № 3 (21). С. 180–196.
2. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 86. Pp. 360–377.
3. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. Устойчивое развитие логистических цепей грузопотоков: монография. М.: Инфра-М, 2025. 303 с.
4. A systematic literature review on green supply chain management: Research implications and future perspectives / U. R. de Oliveira [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 187. Pp. 537–561.
5. Lu K., Liao H., Zavadskas E. K. An overview of fuzzy techniques in supply chain management: bibliometrics, methodologies, applications and future directions // Technological and Economic Development of Economy. 2021. Vol. 27 (2). Pp. 402–458.
6. Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1 (93). С. 90–104.
7. Hoffa-Dabrowska P., Grzybowska K. Simulation modeling of the sustainable supply chain // Sustainability. 2020. Vol. 15 (12). P. 6007.
8. External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro [et al.] // Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 2016. Vol. 2 (10). Pp. 311–322.

9. Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong [et al.] // *Annals of Operations Research*. 2019. Vol. 275. Pp. 339–366.
10. Van Der Vorst J. G. A. J., Tromp S. O., Zee D. J. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics // *International Journal of Production Research*. 2009. Vol. 23 (47). Pp. 6611–6631.
11. Eising J. W., Van Onna T., Alkemade F. Towards smart grids: Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains // *Applied Energy*. 2014. Vol. 123. Pp. 448–455.
12. Moradi S., Sierpiński G., Masoumi H. System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company // *Energies*. 2022. Vol. 13 (15). P. 4917.
13. Sahay N., Ierapetritou M. Supply chain management using an optimization driven simulation approach // *AIChE Journal*. 2013. No. 2 (59). Pp. 4612–4626.
14. Bi-objective decision support tool based on system dynamics and discrete event modelling for sustainable supply chain / J. Yu [et al.] // *Journal of circular economy*. 2023. Pp. 1–20.
15. Vieira A. A. C., Figueira J. R., Fragoso R. A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals // *Expert Systems with Applications*. 2023. P. 120757.
16. Tao Z., Li M. What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak // *Energy Policy*. 2007. Vol. 6 (35). Pp. 3145–3154.
17. Orji I. J., Wei S. An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection: A case on manufacturing industry // *Computers & Industrial Engineering*. 2015. Vol. 88. Pp. 1–12.
18. Guo W., Chen S., Lei M. Evolutionary game and strategy analysis of carbon emission reduction in supply chain based on system dynamic model // *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (11). P. 8933.
19. Kumar A., Rahman S. RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 85. Pp. 382–394.
20. Jing L., Felix T. S. Chan. An agent-based model of supply chains with dynamic structures // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 7 (37). Pp. 5403–5413.
21. Manufacturers' green decision evolution based on multi-agent modeling / Z. Li [et al.] // *Complexity*. 2019. Vol. 14. P. 3512142.
22. Осинцев Н. А. Концепция системы управления логистическими потоками в «зеленых» цепях поставок // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2020. № 2 (46). С. 81–92.
23. Корнилов С. Н., Рахмангулов А. Н., Шаульский Б. Ф. Основы логистики. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. 302 с.
24. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов [и др.] // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2022. № 3 (55). С. 43–59.

Дата поступления: 01.12.2025

Решение о публикации: 11.02.2026

Контактная информация:

МИШКУРОВ Павел Николаевич — канд. техн.

наук, доцент; p.mishkurov@magtu.ru

ОСИНЦЕВ Никита Анатольевич — д-р техн. наук,

профессор; osintsev@magtu.ru

РАХМАНГУЛОВ Александр Нельевич — д-р техн.

наук, профессор; ran@magtu.ru

КОРНИЛОВ Сергей Николаевич — д-р техн. наук,

профессор; kornilov_sn@mail.ru

A hybrid multi-criteria simulation model of green supply chain components

P. N. Mishkurov, N. A. Osintsev, A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov

Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU), 38 Lenin pr., Magnitogorsk, 455000, Russia

For citation: *Mishkurov P. N., Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N. A hybrid multi-criteria simulation model of green supply chain components // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 50–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-50-61. (In Russian)*

Abstract

Objective: to develop a hybrid multi-criteria simulation model for a green supply chain aimed at identifying an optimal combination of green logistics tools. **Methods:** an analysis of current approaches that integrate multi-criteria decision-making methods with simulation modelling and linear programming was performed. The research explored the application of multi-criteria simulation models to represent the dynamic interactions among green supply chain indicators, material flow parameters, and green logistics tools. A major drawback of current integrated models lies in the selection of green logistics instruments: they often omit comprehensive assessments of sustainability indicators specific to each supply chain component and inadequately incorporate constraints arising from logistics resources. Consequently, creating a unified framework that combines multi-criteria analysis, optimization techniques, and simulation modelling is essential to advance the sustainability of green supply chains. **Results:** a method for integrating multi-criteria analysis, linear programming, and simulation modelling techniques has been proposed. **Practical significance:** the model developed in this research facilitates multi-criteria decision-making regarding the selection and application of effective green logistics tools within the supply chain.

Keywords: sustainable development, green logistics, supply chain, hybrid model, multi-criteria model, simulation model, optimization

* *The study was supported by a grants from the Russian Science Foundation:
№ 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>,
№ 23-11-00164, <https://rscf.ru/project/23-11-00164/>.*

References

1. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. Otsenka ustojchivosti tsepej postavok na osnove serogo relyatsionnogo analiza // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova. 2023. No. 3 (21). S. 180–196. (In Russian)
2. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 86. Pp. 360–377.
3. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N. Ustojchivoe razvitie logisticheskikh tsepej gruzopotokov: monografiya. M.: Infra-M, 2025. 303 c. (In Russian)
4. A systematic literature review on green supply chain management: Research implications and future perspectives / U. R. de Oliveira [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 187. Pp. 537–561.
5. Lu K., Liao H., Zavadskas E. K. An overview of fuzzy techniques in supply chain management: bibliometrics, methodologies, applications and future directions // Technological and Economic Development of Economy. 2021. Vol. 27 (2). Pp. 402–458.
6. Kontseptsiya gibridnoj mnogokriterial'noj modeli ustojchivoj tsepi postavok / N. A. Osintsev [i dr.] // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. No. 1 (93). S. 90–104. (In Russian)

7. Hoffa-Dabrowska P., Grzybowska K. Simulation modeling of the sustainable supply chain // *Sustainability*. 2020. Vol. 15 (12). P. 6007.
8. External integration mechanisms effect on the logistics performance of fruit supply chains. A dynamic system approach / J. A. Orjuela-Castro [et al.] // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2016. Vol. 2 (10). Pp. 311–322.
9. Sustainability dimensions and PM 2.5 in supply chain logistics / J. Hong [et al.] // *Annals of Operations Research*. 2019. Vol. 275. Pp. 339–366.
10. Van Der Vorst J. G. A. J., Tromp S. O., Zee D. J. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics // *International Journal of Production Research*. 2009. Vol. 23 (47). Pp. 6611–6631.
11. Eising J. W., Van Onna T., Alkemade F. Towards smart grids: Identifying the risks that arise from the integration of energy and transport supply chains // *Applied Energy*. 2014. Vol. 123. Pp. 448–455.
12. Moradi S., Sierpiński G., Masoumi H. System dynamics modeling and fuzzy MCDM approach as support for assessment of sustainability management on the example of transport sector company // *Energies*. 2022. Vol. 13 (15). P. 4917.
13. Sahay N., Ierapetritou M. Supply chain management using an optimization driven simulation approach // *AIChE Journal*. 2013. No. 2 (59). Pp. 4612–4626.
14. Bi-objective decision support tool based on system dynamics and discrete event modelling for sustainable supply chain / J. Yu [et al.] // *Journal of Circular Economy*. 2023. Pp. 1–20.
15. Vieira A. A. C., Figueira J. R., Fragoso R. A multi-objective simulation-based decision support tool for wine supply chain design and risk management under sustainability goals // *Expert Systems with Applications*. 2023. P. 120757.
16. Tao Z., Li M. What is the limit of Chinese coal supplies – A STELLA model of Hubbert Peak // *Energy Policy*. 2007. Vol. 6 (35). Pp. 3145–3154.
17. Orji I. J., Wei S. An innovative integration of fuzzy-logic and systems dynamics in sustainable supplier selection: A case on manufacturing industry // *Computers & Industrial Engineering*. 2015. Vol. 88. Pp. 1–12.
18. Guo W., Chen S., Lei M. Evolutionary game and strategy analysis of carbon emission reduction in supply chain based on system dynamic model // *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (11). P. 8933.
19. Kumar A., Rahman S. RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 85. Pp. 382–394.
20. Jing L., Felix T. S. Chan. An agent-based model of supply chains with dynamic structures // *Applied Mathematical Modelling*. 2013. Vol. 7 (37). Pp. 5403–5413.
21. Manufacturers' Green Decision Evolution Based on Multi-Agent Modeling / Z. Li [et al.] // *Complexity*. 2019. Vol. 14. P. 3512142.
22. Osintsev N. A. Kontsepsiya sistemy upravleniya logisticheskimi potokami v "zelenykh" tsepyakh postavok // *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2020. No. 2 (46). S. 81–92. (In Russian)
23. Kornilov S. N., Rakhmangulov A. N., Shaul'skij B. F. Osnovy logistiki. M.: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2016. 302 s. (In Russian)
24. Imitatsionnye modeli v tsifrovyykh dvojnnykh zheleznodorozhnykh uzlov / A. N. Rakhmangulov [i dr.] // *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2022. No. 3 (55). S. 43–59. (In Russian)

Received: 01.12.2025

Accepted: 11.02.2026

Author's information:

Pavel N. MISHKUROV — PhD in Engineering, Associate Professor; p.mishkurov@magtu.ru

Nikita A. OSINTSEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; osintsev@magtu.ru

Aleksandr N. RAKHMANGULOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ran@magtu.ru

Sergey N. KORNILOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; kornilov_sn@mail.ru

УДК 629.423.24

Разработка цифровой модели электропоезда «Ласточка» для анализа тяговых и энергетических характеристик в программной среде SimInTech

А. Н. Сычугов

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

Для цитирования: Сычугов А. Н. Разработка цифровой модели электропоезда «Ласточка» для анализа тяговых и энергетических характеристик в программной среде SimInTech // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 62–70. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-62-70

Аннотация

Цель: разработка цифровой модели электропоезда «Ласточка» в универсальной среде общетехнического моделирования SimInTech для комплексного анализа его энергопотребления и динамики. Цифровая модель электропоезда позволяет исследовать влияния различных эксплуатационных факторов на тягово-энергетические характеристики подвижного состава. **Методы:** исследование проводилось методом математического и имитационного моделирования в программной среде SimInTech. **Результаты:** разработана модель, алгоритмы которой позволяют варьировать основные факторы, оказывающие влияние на энергетику движения поезда: параметры тягового подвижного состава, характеристики пути (профиль, план, движение в тоннеле), состояние системы энергоснабжения, массу поезда в зависимости от населенности поезда, а также внешние климатические условия (скорость и направление ветра). **Практическая значимость:** результаты работы имеют значение для инженерной практики в области железнодорожного транспорта. Разработанная модель служит эффективным инструментом для виртуальных испытаний, анализа энергоэффективности и оптимизации режимов ведения поезда с целью снижения эксплуатационных затрат. Модель может быть интегрирована в более сложные имитационные системы и использована для решения нестандартных исследовательских задач, включая разработку систем оптимального управления и прогнозирование энергопотребления на новых маршрутах.

Ключевые слова: цифровая модель электропоезда, тяговые расчеты, энергетические характеристики электропоезда, моделирование тягового подвижного состава в SimInTech

Введение

Железнодорожный транспорт — один из ключевых потребителей энергоресурсов в Российской Федерации. На его долю приходится приблизительно 5% от общего объема производимой в стране электроэнергии и почти 12% дизельного топлива [1]. В связи с этим решение задач, связанных с точным расчетом и прогнозированием потребления энергетических ресурсов, приобретает первостепен-

ное значение для повышения экономической и эксплуатационной эффективности отрасли.

Решение подобных задач, как правило, осуществляется методами численного моделирования с применением специализированного программного обеспечения, например, системы «КОРТЭС» (комплекс расчетов тягового электроснабжения, ВНИИЖТ), «ИСКРА» и ее последующих версий «ЭРА» и «ЭТР» (интегрированная система комплексных расчетов

и анализа движения поездов, ДвГУПС), а также программы DriVe (Siemens) и пр. [2–4].

Несмотря на наличие удобного пользовательского интерфейса для задания характеристик подвижного состава, параметров пути и режимов движения, специализированные программные комплексы обладают существенным недостатком — ограниченной гибкостью. Жестко заданная архитектура не позволяет модифицировать алгоритмы расчета, получать промежуточные данные или интегрировать решение в сторонние программные среды. В связи с этим в последние годы существенно возрос интерес к применению универсальных сред общетехнического моделирования, таких как MatLab, SimInTech и Engee, а также к реализации расчетных алгоритмов непосредственно на языках программирования высокого уровня, например Python. Перечисленные инструменты позволяют осуществить полный контроль над моделью и ее параметрами, благодаря чему становится возможным решать нестандартные задачи.

Рассмотрим процесс разработки цифровой модели электропоезда «Ласточка», предназначенной для анализа его тяговых и энергетических характеристик в среде SimInTech. Выбор данного программного обеспечения был обусловлен рядом ключевых преимуществ. В их числе — статус российского программного продукта; наличие специализированных инструментов, подходящих для решения поставленных задач; широкие возможности интеграции модели со сторонним программным обеспечением и периферийными устройствами.

Математическая и компьютерная модели электропоезда

Уравнение движения поезда как материальной точки описывается выражением:

$$(1 + \gamma)M_{\Pi} \frac{dv}{dt} = F(v) - W(v) - B(v), \quad (1)$$

где γ — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс;

M_{Π} — масса поезда;

v — скорость движения;

t — функция времени;

$F(v)$ — сила тяги;

$W(v)$ — сила сопротивления движению;

$B(v)$ — тормозная сила.

Уравнение движения поезда (1) определяет связь в дифференциальной форме между массой поезда, его скоростью, ускорением, временем движения и действующими на поезд силами. Результаты тяговых расчетов удобно представлять не в зависимости от времени, а в зависимости от пройденного пути, так как кривые движения представляют собой функции скорости от пути [5, 6].

Расчет правой части уравнения (1) выполняется с помощью трех блоков «Язык программирования», задающих, соответственно, тяговую $F(v)$ и тормозную $B(v)$ характеристики электропоезда, а также функцию, описывающую основное сопротивление движению $W(v)$ электропоезда (рис. 1).

Тяговая характеристика пятивагонного электропоезда задается с помощью выражения:

$$F_T = \begin{cases} 280 \text{ кН при } v(t) \in [0; 37,7] \text{ км/ч} \\ 280 \cdot \frac{37,7}{v(t)} \text{ кН при } v(t) \in (37,7; 115] \text{ км/ч} \\ 91 \cdot \left(\frac{115}{v(t)}\right)^2 \text{ кН при } v(t) \in (115; 160] \text{ км/ч} \end{cases} \quad (2)$$

Управление реализацией тяговых усилий производится под контролем автоматизированной системы управления в соответствии с командами, поступающими с пульта машиниста или от системы автоведения поезда. Команда на реализацию тягового усилия формируется контроллером тяги/торможения. Машинист может задать реализацию тягового

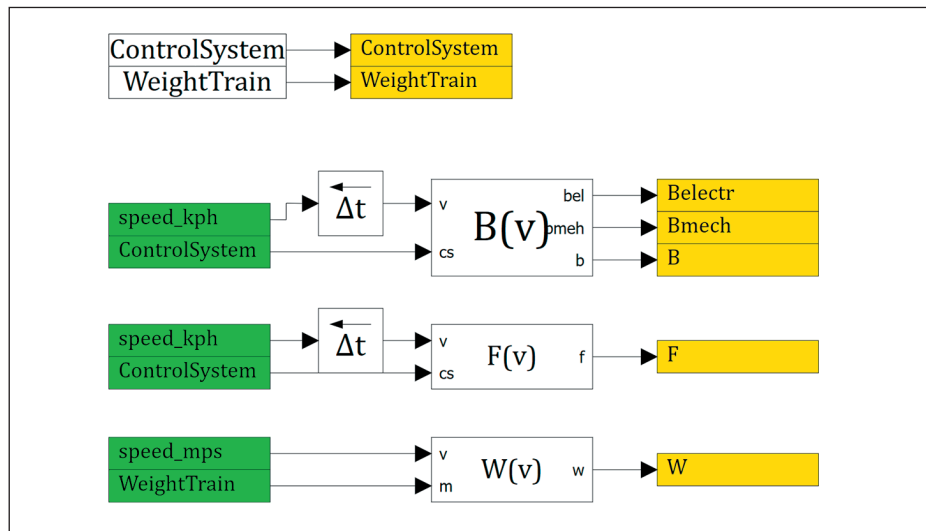


Рис. 1. Компьютерная модель для расчета сил, действующих на поезд

усилия в интервале от 0 до 100%. На рис. 2 приведены тяговые характеристики электропоезда, рассчитанные с помощью выражения (2) для четырех значений положения контроллера машиниста: 25, 50, 75 и 100% [9, 10].

Основным видом торможения на электропоездах «Ласточка» является торможение тяговыми электродвигателями (электродинамическое торможение). В штатном режиме реализуется рекуперативное торможение, но при невозможности тяговой сети принять рекуперированную энергию автоматически включается тормозной регулятор и реализуется рекуперативно-реостатное торможение. Управление штатным режимом торможения осуществляется посредством контроллера тяги/торможения.

Разница между заданной и реализуемой электродинамическим тормозом тормозной силой компенсируется пневматическими тормозами. При моделировании принимается, что максимальная тормозная сила поезда $B_{\text{полн}} = 235$ кН.

Тормозные характеристики для электродинамического торможения $B_{\text{эд}}$ задаются с помощью выражения:

$$B_{\text{эд}} = \begin{cases} -\frac{210}{5} \cdot v(t) \text{ кН при } v(t) \in [0; 5] \text{ км/ч} \\ -210 \text{ кН при } v(t) \in (5; 43,72] \text{ км/ч} \\ -210 \cdot \frac{43,72}{v(t)} \text{ кН при } v(t) \in (43,72; 160] \text{ км/ч} \end{cases} \quad (3)$$

Основное сопротивление движению [7, 8] пятивагонного поезда W_0 определяется по формуле:

$$W_0 = a \cdot v(t) + b \cdot M_{\text{п}} + c \cdot v^2(t), \quad (4)$$

где a , b , c — постоянные коэффициенты для подвижного состава;

$v(t)$ — скорость движения электропоезда, км/ч;

$M_{\text{п}}$ — масса поезда, кг.

Коэффициент инерции вращающихся масс γ в расчетах принят равным 0,06.

Результаты моделирования следующих характеристик: тяговой, торможения электродинамического и основного сопротивления движения для пятивагонного электропоезда «Ласточка», полученные с помощью компьютерной модели (рис. 1), представлены на рис. 2.

Для расчета и построения графиков потребляемого тока при движении в режиме тяги и тока рекуперации в режиме электрического

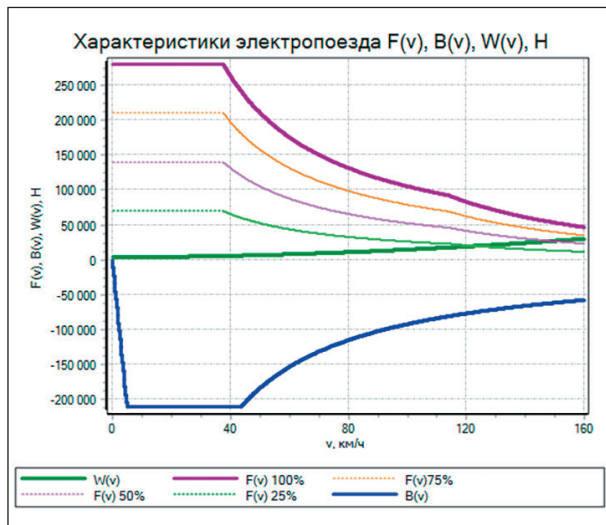


Рис. 2. Результаты моделирования характеристик: тяговой, торможения электродинамического и основного сопротивления движения для пятивагонного электропоезда «Ласточка»

торможения необходимо рассчитать электрическую мощность, потребляемую электропоездом при движении. Для этого необходимо рассчитать механическую мощность $P_{\text{МЭХ}}$ в соответствии с выражением (5):

$$P_{\text{МЭХ}}(t) = F(t) \cdot v(t), \quad (5)$$

где $F(t)$ — развиваемая сила тяги, Н;
 $v(t)$ — скорость движения, м/с.

Потери, возникающие при передаче энергии при работе тягового электропривода, рассчитываются с помощью блока «Интерполяция одномерной кривой» (результаты расчета приведены на рис. 3), описывающего изменение коэффициента полезного действия тягового электропривода $\eta_{\text{ОБЩ}}$ в зависимости от скорости движения электропоезда, что позволяет рассчитать электрическую мощность $P_{\text{ЭЛ}}$, потребляемую из контактной сети, по выражению:

$$P_{\text{ЭЛ}}(t) = \frac{P_{\text{МЭХ}}(t)}{\eta_{\text{ОБЩ}}(t)}. \quad (6)$$

Максимальная мощность электропоезда, согласно характеристике (рис. 4), должна достигаться в следующих, представленных ниже диапазонах напряжений (табл. 1). Указанное ограничение реализовано с помощью блока «Язык программирования».

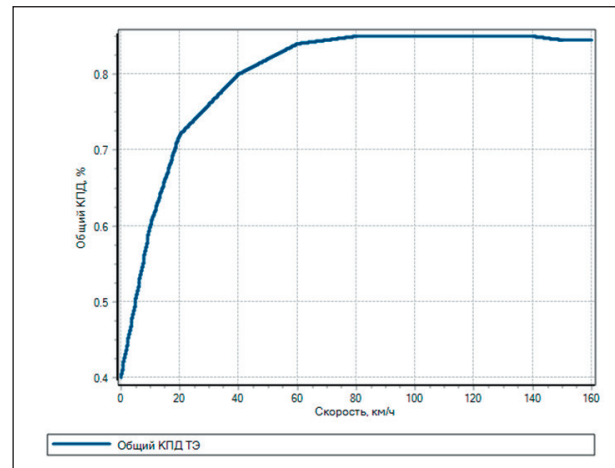


Рис. 3. Результаты моделирования КПД тягового оборудования электропоезда в зависимости от скорости движения (при эксплуатации на участках, электрифицированных постоянным током)

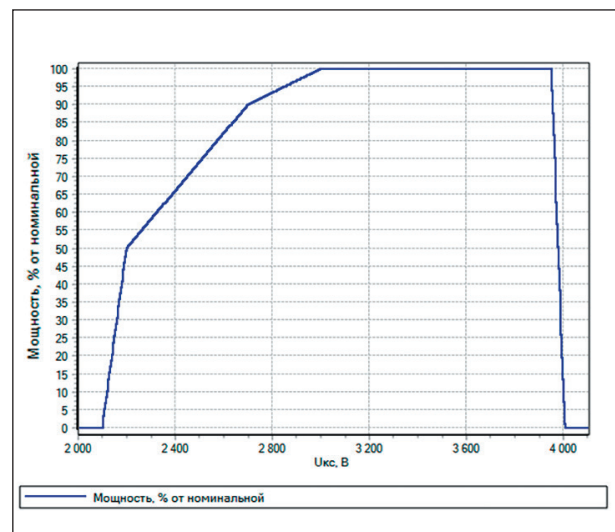


Рис. 4. Результаты моделирования блока, рассчитывающего ограничение допустимой мощности электропоезда

ТАБЛИЦА 1. Ограничение реализуемой мощности электропоезда

Напряжение контактной сети, В	Реализуемое ограничение мощности, % от номинального значения
2100	0
2200	50
2700	90
3000	100
3950	100
4005	0

Для расчета, прогнозирования, моделирования и оптимизации энергозатрат движения поезда необходима комплексная цифровая модель, учитывающая многопараметрический характер системы. Модель должна учитывать не только характеристики подвижного состава, но и основные факторы, оказывающие влияние на энергетику движения поезда: профиль пути, характеристики системы тягового энергоснабжения, массу поезда (населенность), климатические условия и пр. Цифровая модель электропоезда «Ласточка», реализованная в SimInTech (рис. 5), обеспечивает учет ключевых факторов, влияющих на его эксплуатационные показатели [9, 10].

В ее алгоритмы заложена возможность вариации входных параметров, включая профиль пути, движение в тоннеле, параметры системы энергоснабжения, населенность поезда и погодные условия (ветер). Модель позволяет реализовать ручное управление поездом с помощью имитатора контроллера тяги/торможения в режиме реального времени, а также автоматический расчет по заранее заданному алгоритму ведения поезда. Такие режимы позволяют проводить детальный анализ нелинейного

взаимовлияния указанных факторов на энергопотребление и динамику поезда в целом.

Разработанная модель позволяет построить кривые движения поезда (рис. 6) для различных режимов эксплуатации и выполнить расчет полного и удельного расхода электрической энергии, затрачиваемой на тягу. Полученные показатели могут быть визуализированы различными способами: в виде временных графиков, табличных данных, пригодных для последующего анализа, а также с использованием графических примитивов, имитирующих интерфейсы штатных средств отображения информации на реальном электропоезде [11, 12].

На рис. 6 представлены результаты моделирования движения электропоезда на перегоне. График отображает следующие параметры: скорость движения, ток электропоезда в режимах тяги и рекуперативного торможения, реализуемые силы тяги и торможения. В качестве контекстной информации на диаграмму выведена величина текущего уклона пути. Исходные данные о профиле пути и иные параметры интегрируются в модель путем импорта из внешнего файла.

Заключение

Разработанная цифровая модель электропоезда «Ласточка» подтвердила перспективность и эффективность применения универсальной среды моделирования SimInTech для решения многопараметрических задач в области тягово-энергетических расчетов на железнодорожном транспорте. Цифровые модели тягового подвижного состава представляют собой эффективный инструмент для анализа влияния эксплуатационных факторов на тягово-энергетические характеристики и позволяют проводить их комплексную оценку при различных сценариях эксплуатации.

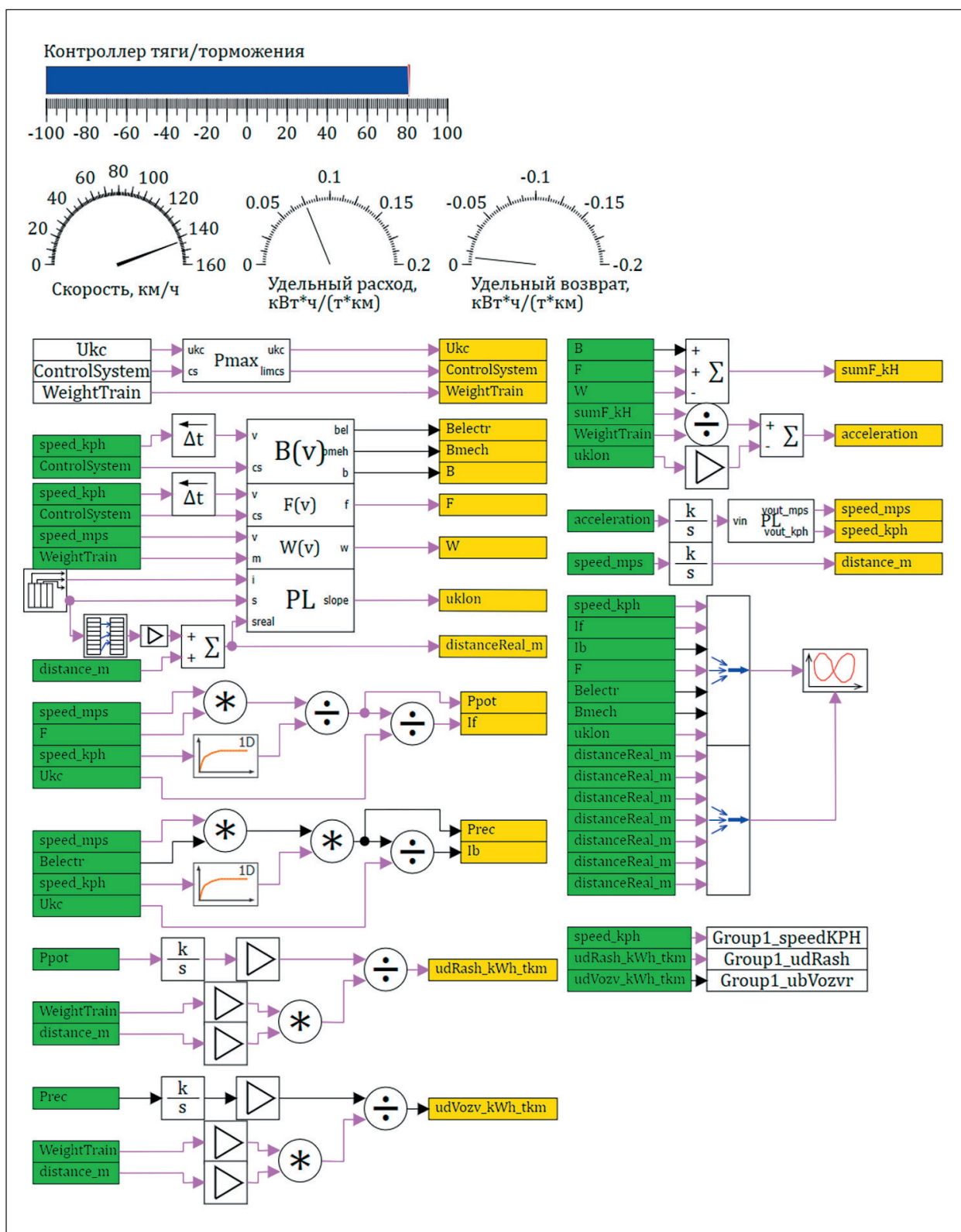


Рис. 5. Цифровая модель электропоезда «Ласточка» для анализа тяговых и энергетических характеристик в программной среде SimInTech

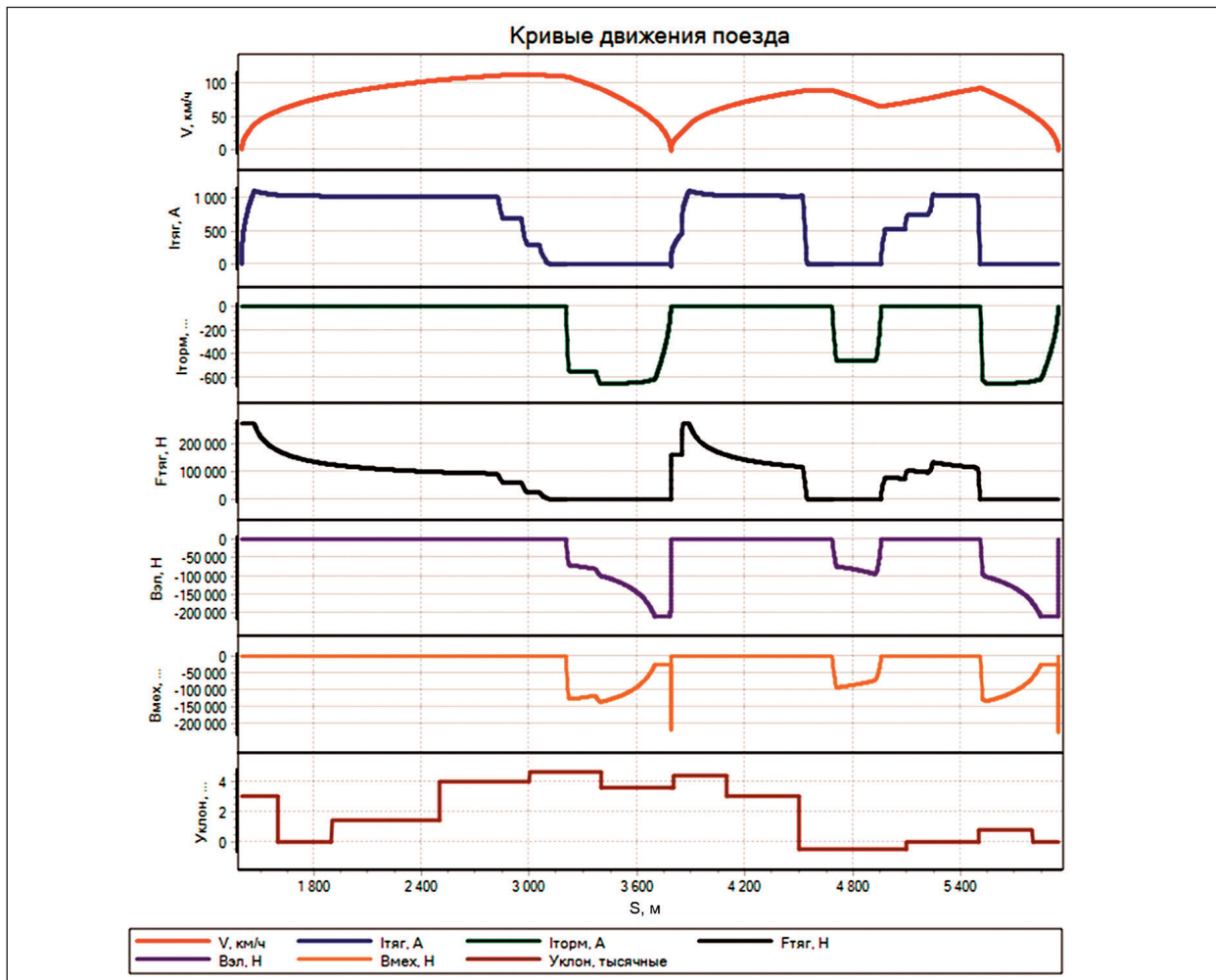


Рис. 6. Кривые движения поезда, полученные с помощью цифровой модели электропоезда «Ласточка» в программной среде SimInTech

Список источников

1. Транспорт в России. 2024: стат. сб. / Росстат. Т. 65. М., 2024. 100 с.

2. Обоснование параметров системы тягового электроснабжения для ВСМ Москва — Казань — Екатеринбург / М. А. Иванов [и др.] // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: VII Международный симпозиум (Санкт-Петербург, 8–11 октября 2013 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. С. 189–197.

3. Явриянц К.В. Возможности снижения топливно-энергетических затрат на тягу поездов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 40–44.

4. Валинский О.С., Калинин Н.68П. Исследование тягово-энергетических характеристик высокоскоростных электропоездов // Локомотивы. Электрический транспорт — XXI век: электронный сборник материалов IX Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора Я.М. Гаккеля и 100-летию создания тепловоза Щэл1 (Санкт-Петербург, 15–17 мая 2024 года). СПб.: Петербургский государственный университет

путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 49–55.

5. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1983. 328 с.

6. Правила тяговых расчетов для поездной работы: нормативное производственно-практическое издание (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867). М.: ОАО «РЖД», 2016. 515 с.

7. Davis Jr. W. J. The tractive resistance of electric locomotives and cars // Gen. Electr. Rev. 1926. No. 29. Pp. 2–24.

8. Simplified estimation of train resistance parameters: full scale experimental tests and analysis / C. Somaschini [et al.] // Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance / ed. J. Pombo // Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. 2016. 58 p.

9. Скоростной электропоезд ЭС1 «Ласточка» / А.Ю. Слизов [и др.]. М.: Автограф, 2015. 236 с.

10. Руководство по эксплуатации электропоезда ЭС1 «Ласточка» Desiro RUS, Desiro RUS «Премиум», версия F. 2015. 402 с.

11. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стереотип. СПб.: Лань, 2024. 120 с.

12. Справочная система SimInTech. URL: <https://help.simintech.ru/> (дата обращения: 11.10.2025).

Дата поступления: 24.11.2025

Решение о публикации: 13.02.2026

Контактная информация:

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

Development of a “Lastochka” electric train digital model to analyze its traction and energy characteristics in the SimInTech environment

A. N. Sychugov

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

For citation Sychugov A. N. Development of a “Lastochka” electric train digital model to analyze its traction and energy characteristics in the SimInTech environment // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 62–70. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-62-70. (In Russian)

Abstract

Objective: to develop a digital model of the “Lastochka” electric train within the SimInTech universal general-purpose modelling environment for a comprehensive analysis of its energy consumption and dynamic behaviour. The digital model enables examination of the influence of various operational factors on the train traction and energy characteristics. **Methods:** the study employed mathematical and simulation modelling implemented in the SimInTech software environment. **Results:** a model has been developed, with its algorithms allowing variation of the main factors affecting the train’s energy performance. These factors include traction train parameters; track characteristics such as vertical profile, horizontal alignment, and operation in tunnels; the condition of the power supply system; train mass as a function of passenger load; and external climatic conditions, such as wind speed and direction. **Practical significance:** the findings of

this study are relevant to engineering practice in the railway transport sector. The developed model provides an effective tool for virtual testing, energy-efficiency analysis, and optimization of train operational modes aimed at reducing operational costs. The model can be integrated into more comprehensive simulation frameworks. It can be employed to address non-standard research challenges, including the development of optimal control systems and the forecasting of energy consumption on new routes.

Keywords: electric train digital model, traction calculations, electric train energy performance, traction rolling stock modeling in SimInTech

References

1. Transport v Rossii. 2024: stat. sb. / Rosstat. T. 65. M.: 2024. 100 s. (In Russian)
2. Obosnovanie parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya dlya VSM Moskva — Kazan' — Ekaterinburg / M.A. Ivanov [i dr.] // Elektrifikatsiya i razvitie infrastruktury energoobespecheniya tyagi poezdov skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: VII Mezhdunarodnyj simpozium (Sankt-Peterburg, 8–11 oktyabrya 2013 goda). SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2015. S. 189–197. (In Russian)
3. Yavriyants K. V. Vozmozhnosti snizheniya toplivno-energeticheskikh zatrat na tyagu poezdov // Zheleznodorozhnyj transport. 2011. No. 2. S. 40–44. (In Russian)
4. Valinskij O. S., Kalinin N. P. Issledovanie tyagovo-energeticheskikh kharakteristik vysokoskorostnykh elektropoezdov // Lokomotivy. Elektricheskij transport — XXI vek: elektronnyj sbornik materialov IX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashchennoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora Ya. M. Gakkelya i 100-letiyu sozdaniya teplovoza Shchel1 (Sankt-Peterburg, 15–17 maya 2024 goda). SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2024. S. 49–55. (In Russian)
5. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. Teoriya elektricheskoy tyagi. M.: Transport, 1983. 328 s. (In Russian)
6. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty: normativnoe proizvodstvenno-prakticheskoe izdanie (utv. rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 12.05.2016 No. 867). M.: OAO “RZhD”, 2016. 515 s. (In Russian)
7. Davis Jr. W. J. The tractive resistance of electric locomotives and cars // Gen. Electr. Rev. 1926. No. 29. Pp. 2–24.
8. Simplified Estimation of Train Resistance Parameters: Full Scale Experimental Tests and Analysis / C. Somaschini [et al.] // Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance / ed. J. Pombo // Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK. 2016. 58 p.
9. Skorostnoj elektropoezd ES1 “Lastochka” / A. Yu. Slizov [i dr.]. M.: Avtograf, 2015. 236 s. (In Russian)
10. Rukovodstvo po ekspluatatsii elektropoezda ES1 “Lastochka” Desiro RUS, Desiro RUS “Premium”, versiya F. 2015. 402 s. (In Russian)
11. Khabarov S. P., Shilkina M. L. Osnovy modelirovaniya tekhnicheskikh sistem. Sreda SimInTech: uchebnoe posobie dlya vuzov. 2-e izd., stereotip. SPb.: Lan', 2024. 120 s. (In Russian)
12. Spravochnaya sistema SimInTech. URL: <https://help.simintech.ru/> (data obrashcheniya: 11.10.2025). (In Russian)

Received: 24.11.2025

Accepted: 13.02.2026

Author's information:

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

УДК 621.331

Интегральная модель для считывания и статистического анализа графиков нагрузки тягового подвижного состава

А. А. Галков, И. А. Худоногов

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

Для цитирования: Галков А. А., Худоногов И. А. Интегральная модель для считывания и статистического анализа графиков нагрузки тягового подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 71–80. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-71-80

Аннотация

В данной статье идет описание компьютерной модели, созданной в программном комплексе SimInTech. Модель сформирована с целью считывания токовой тяговой нагрузки из программных комплексов Fazanord и КОРТЭС, преобразования ее в эквивалентные значения сопротивления нагрузки и потребляемой мощности, а также статистического анализа полученного временного графика нагрузки. Необходимость создания модели, выполняющей такое преобразование, обусловлена возможностью моделировать в SimInTech систему тягового электроснабжения в режимах с не учитываемыми ранее факторами, влияющими на ее работу. Например, регулирование напряжения системы в автоматическом режиме посредством устройства РПН. Однако моделирование тяговой нагрузки является трудоемким и сложным процессом, поэтому, чтобы смоделировать тяговую нагрузку, было принято решение воспользоваться программами Fazanord и КОРТЭС, которые уже давно прошли апробацию. Данные программы позволяют делать выгрузку тяговых расчетов в файл формата .txt, из которого данные считываются программой SimInTech. Также во время расчета проводится статистический анализ на равномерность графиков нагрузки. Модель создана на базе типовых блоков SimInTech, а также программируемых блоков, в которых посредством собственного языка программы написаны условия и формулы для выполнения необходимых расчетов. В модели проведено несколько расчетов, в том числе пробный, благодаря которому оценивалась корректность вычислений, выполняемых программой. Созданная модель является промежуточным звеном для решения задач, направленных на исследование возможностей совершенствования работы и повышения периода эксплуатации устройств РПН при его работе в автоматическом режиме в системах тягового электроснабжения. **Цель:** создать модель в программном комплексе SimInTech, способную преобразовывать токовые значения тяговой нагрузки из программных комплексов КОРТЭС и Fazanord в эквивалентные значения сопротивления и мощности для их применения в дальнейшем при моделировании, а также статистического анализа. **Результаты:** в программном комплексе SimInTech была создана компьютерная модель, которая считывает значения токовой нагрузки из файлов формата .txt и преобразует в эквивалентные значения сопротивления. Модель также рассчитывает ключевые показатели, по которым можно охарактеризовать равномерность графика нагрузки. **Практическая значимость:** компьютерная модель позволяет преобразовывать токовую нагрузку в сопротивление для дальнейшего применения в моделировании динамических систем тягового электроснабжения, а также проводит статистический анализ графика нагрузки.

Ключевые слова: статистический анализ, график нагрузки, тяговое электроснабжение, компьютерное моделирование, SimInTech, КОРТЭС, тяговый расчет

Введение

В настоящее время компьютерное моделирование сложных систем позволяет сэкономить большое количество ресурсов и времени [1–3]. Тяговое электроснабжение — сложная электротехническая система, основным потребителем которой является подвижной состав на электрической тяге. В связи с этим нагрузка имеет труднопрогнозируемый характер.

Программные комплексы Fazanord и КОРТЭС уже давно хорошо зарекомендовали себя в сфере моделирования систем тягового электроснабжения. Однако данные комплексы не позволяют моделировать динамические модели и учитывать некоторые особенности. Например, моделировать возможное регулирование напряжения посредством устройств РПН, установленных на тяговых трансформаторах тяговых подстанций, или включение-отключение установок продольной и поперечной компенсации [4–8].

Среда динамического моделирования SimInTech позволяет создавать модели, в которых будут смоделированы не рассматриваемые ранее в программных комплексах сложные динамические процессы, подлежащие более детальному изучению [9]. Поскольку Fazanord и КОРТЭС являются надежными, прошедшими апробацию программными комплексами, которые способны выполнять тяговые расчеты и не только, было принято решение создать программу в SimInTech, позволяющую считывать нагрузку из Fazanord и КОРТЭСа и тем

самым интегрировать данные расчетов всех трех программных средств.

Тяговый расчет

В этом исследовании для создания нагрузки использовался программный комплекс КОРТЭС, но Fazanord тоже может создавать тяговую нагрузку. Чтобы получить нужные данные, в КОРТЭСе были проведены расчеты для двух типов поездов — грузового и пригородного. Грузовые поезда имели составы весом 7100, 4500 и 3000 т. Локомотивами для грузовых поездов были выбраны модели 2ЭС5К и 3ЭС5К. Пригородный поезд состоял из 5 вагонов и весил 624 т. В табл. 1 приведены основные характеристики этих поездов.

Тяговый расчет выполнялся на участке Иркутск сортировочный — Зима, который отличается сложным профилем пути. Длина этого участка составляет 243,1 км. Профиль пути показан ниже на рис. 1 и 2.

В ходе выполнения тягового расчета создается «отчет о поездке», в котором дается основная информация по выполненному расчету. В окно отчета можно выгрузить файл в формате .txt, в котором указываются координаты движения, зависимости скорости поезда, активного и полного токопотребления от времени. Поскольку для создания нагрузки не нужны параметры скорости и координаты движения, то для создания нагрузки использовались только значения активного и полного

ТАБЛИЦА 1

Наименование	Категория	Локомотив	Кол-во секций, ед.	Масса поезда, т	Масса состава, т
Грузовой 3000	Грузовой	2ЭС5К	2	3000	3192
Грузовой 4500	Грузовой	2ЭС5К	2	4500	4692
Грузовой 7100	Грузовой	3ЭС5К	3	7100	7388
Пригород	Пригород	ЭД9Т	5	624	—

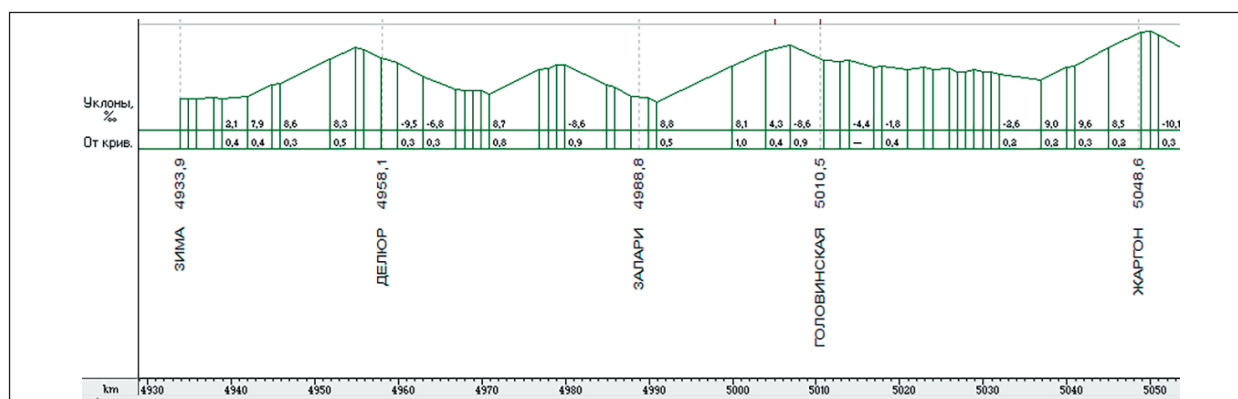


Рис. 1. Профиль пути на участке Зима — Жаргон

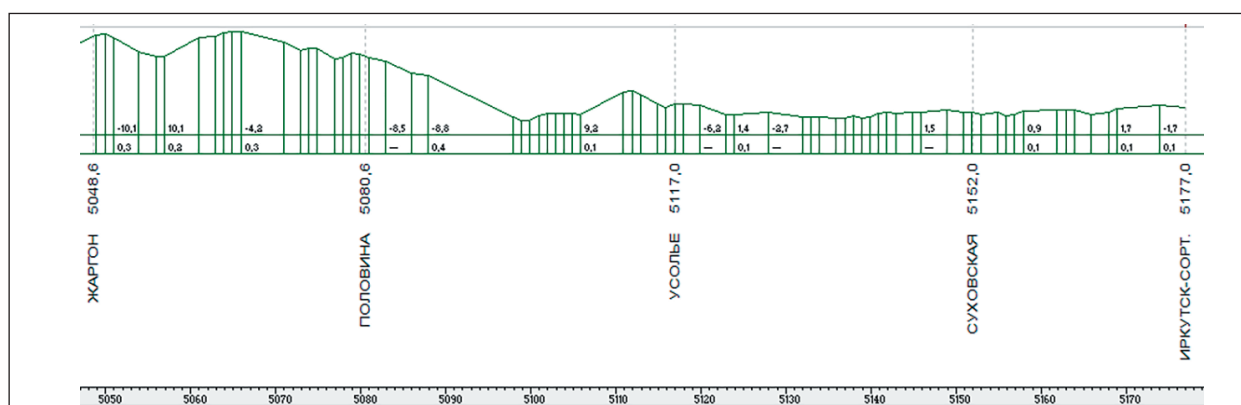


Рис. 2. Профиль пути на участке Жаргон — Иркутск Сортировочный

токопотребления. Период усреднения тока приняли равным 1 мин.

На рис. 3 показан пример отчета о поездке в КОРТЭСе и выгрузка данного отчета в файл .txt.

Моделирование

Была создана специальная модель в SimInTech, общий вид которой показан на рис. 4.

Данную модель можно разделить условно на три основные части:

1. Секция считывания данных из файла.

Данная секция позволяет задать наименование файла в формате .txt, из которого будут считываться данные, шаг их считывания и количество считываемых данных (количество столбцов).

2. Секция вычисления мощности нагрузки и сопротивления.

Мощность нагрузки и сопротивление напрямую зависят от номинального напряжения в сети, поэтому в данной модели мы подключили блок константы со значением 27 500, так как это номинальное значение напряжения контактной сети на фидерах тяговой подстанции. Блок константы можно заменить вольтметром, считывающим показания напряжения в режиме реального времени в модели. Тогда показания сопротивления и мощности будут вычисляться более точно в связи с тем, что на практике значение напряжения может быть ниже из-за потерь в контактной сети, на нагрузке и по причине других факторов.

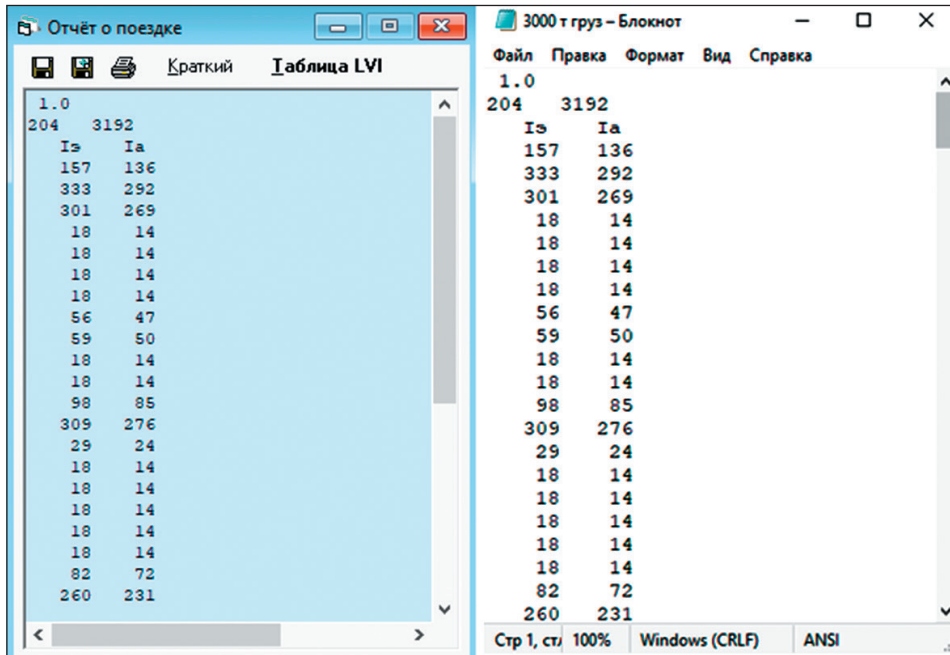


Рис. 3. Отчет о поездке с токовыми значениями нагрузки

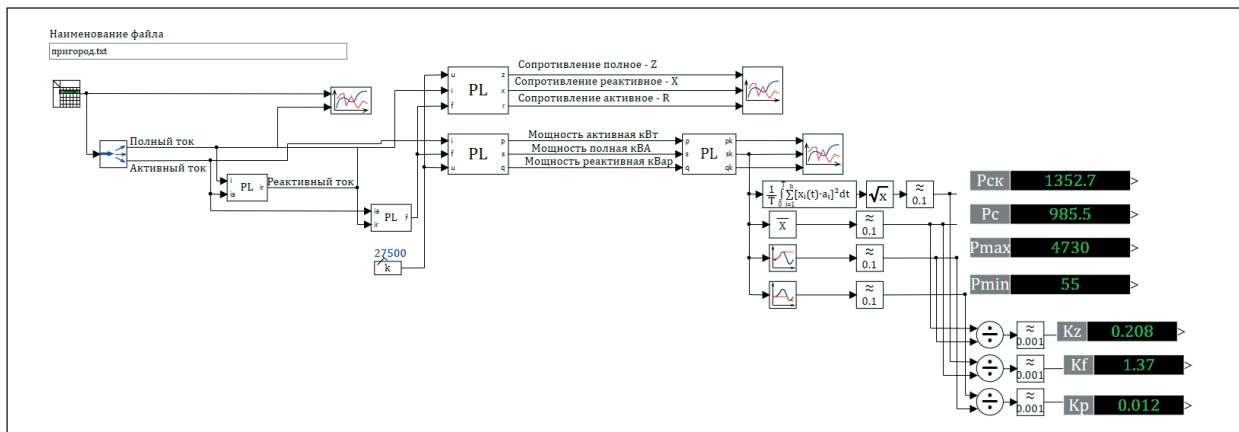


Рис. 4. Общий вид компьютерной модели в SimInTech

Программа выполняет расчеты по следующим формулам.

Вычисляется реактивный ток нагрузки и угол сдвига фаз — φ:

$$I_{\text{полн}} = \sqrt{I_{\text{актив}}^2 + I_{\text{реакт}}^2}, \quad (1)$$

где $I_{\text{полн}}$ — полное значение тока;

$I_{\text{актив}}$ — активная составляющая значения тока;

$I_{\text{реакт}}$ — реактивная составляющая значения тока.

Отсюда:

$$I_{\text{реакт}} = \sqrt{I_{\text{полн}}^2 - I_{\text{актив}}^2}. \quad (2)$$

Вычисляется угол φ:

$$\varphi = \arctg \frac{I_{\text{реакт}}}{I_{\text{актив}}}. \quad (3)$$

Вычисляются сопротивления — полное (Z), активное (P) и реактивное (X):

$$Z = \frac{U}{I_{\text{полн}}}, \quad (4)$$

где U – действующее значение напряжения,

$$X = Z \cdot \sin(\varphi), \quad (5)$$

$$R = Z \cdot \cos(\varphi). \quad (6)$$

Вычисляется мощность — полная (S), активная (P) и реактивная (Q):

$$S = I_{\text{полн}} \cdot U, \quad (7)$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi), \quad (8)$$

$$P = S \cdot \cos(\varphi). \quad (9)$$

Именно данные значения можно использовать для задания нагрузки в модели системы тягового электроснабжения, созданной в SimInTech.

На рис. 5 представлен график токовой нагрузки грузового поезда массой 3000 т, преобразованной в эквивалентные значения потребляемой мощности — полной (S), активной (P) и реактивной (Q).

3. Секция вычисления числовых показателей графика электрической нагрузки. Временной график нагрузки можно проанализировать по ключевым показателям, которые могут быть важны при статистическом анализе динамической модели:

- максимальной мощностью P_{max} ;
- минимальной мощностью P_{min} ;
- средней мощностью, которая вычисляется по формуле:

$$P_C = \frac{\Delta t}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (10)$$

где Δt — интервал усреднения нагрузки;

n — число интервалов;

P_i — входной сигнал блока;

- среднеквадратичной мощностью, которая вычисляется по формуле:

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\Delta t}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2}, \quad (11)$$

или

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_i^2(t) dt}, \quad (12)$$

где $T = t$ — текущее модельное время.

Формулу можно получить в SimInTech путем совмещения двух блоков — квадратичного функционала и корня квадратного.

По вышеперечисленным значениям можно получить ключевые коэффициенты, характеризующие график электрической нагрузки:

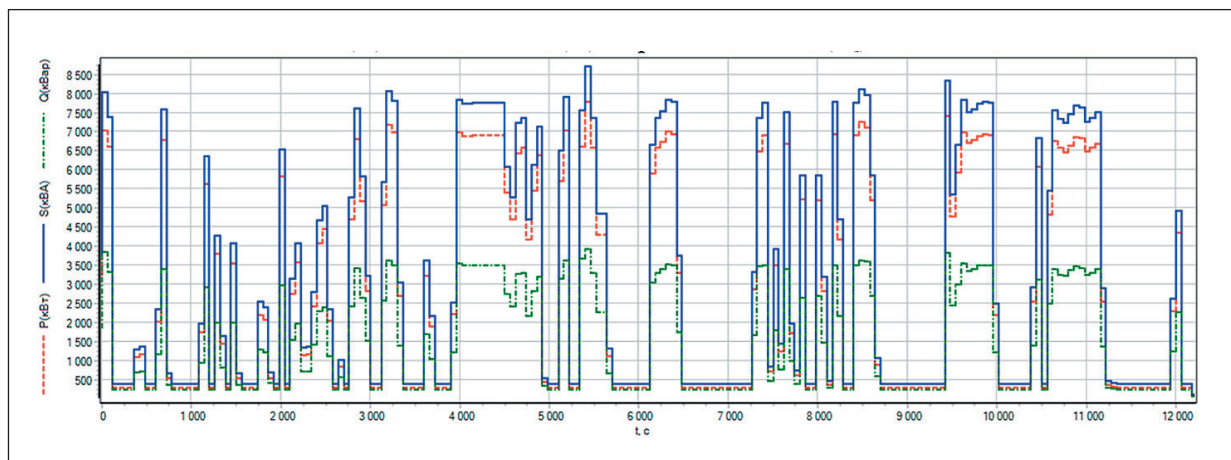


Рис. 5. График мощности тяговой нагрузки для грузового поезда массой 3000 т

- коэффициент заполнения k_Z ;
- коэффициент формы k_F ;
- коэффициент равномерности k_P .

Данные коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$k_Z = \frac{P_C}{P_{max}}; \quad (13)$$

$$k_F = \frac{P_{CK}}{P_C}; \quad (14)$$

$$k_P = \frac{P_{min}}{P_{max}}. \quad (15)$$

Обычно суточные и годовые графики нагрузки у промышленных предприятий имеют значения коэффициентов в следующих пределах:

- $k_Z = 0,4 \dots 0,95$;
- $k_F = 1,01 \dots 1,3$;
- $k_P = 0,1 \dots 0,9$.

В случае если нагрузка представлена неизменной во времени величиной (идеально равномерный график), то $k_Z = k_F = k_P = 1$. Чем «ровнее» график нагрузки, тем ближе к единице значения коэффициентов.

Для проверки корректности работы программы используем график с неизменными во времени значениями нагрузки. Для этого создадим файл формата .txt с наименованием «равномерный», в котором примем значения полного и активного токопотребления 100 А и 50 А соответственно. Укажем наименования файла в специально отведенном для этого поле программы и выполним расчет.

На рис. 6 показаны результаты расчета.

Как мы видим, программа вычислила значения, характеризующие график и условие ($k_Z = k_F = k_P = 1$) для графика с неизменной по времени нагрузкой. Отсюда следует, что программа функционирует корректно. Помимо этого,

программа преобразовала значение токовой нагрузки в мощность и сопротивление.

Расчет показателей и их анализ

Рассчитали показатели для значений активных токовых нагрузок тяговых расчетов различных типов ЭПС, указанных ранее в табл. 1, и свели полученные значения в табл. 2.

Поскольку тяговая нагрузка характеризуется высоким значением индуктивности, то анализировать стоит не только активную составляющую токопотребления, но и полную. Значения произведенного расчета для полной мощности нагрузки указаны в табл. 3.

Анализ таблиц показал, что наиболее прямолинейный график активной составляющей мощности демонстрирует грузовой поезд массой 4500 т, поскольку он имеет k_Z и k_F близкие к единице. Однако проведя аналитику коэффициентов по полной мощности, можно сделать вывод, что прямолинейность графика нагрузки грузового поезда 7100 т приблизительно равна поезду 4500 т. Наибольшую неравномерность графика в обоих случаях демонстрирует пригородный поезд.

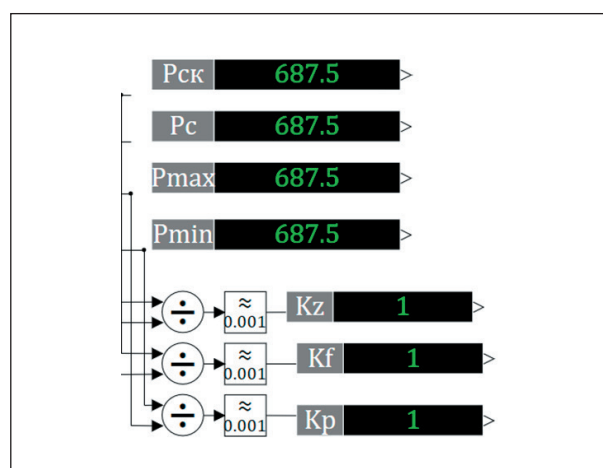


Рис. 6. Визуальные индикаторы модели, на которые выводится информация о статистическом анализе графика нагрузки

ТАБЛИЦА 2

Наименование	P_{max} , кВт	P_{min} , кВт	P_c , кВт	$P_{ск}$, кВт	k_z	k_f	k_p
Грузовой 3000	8717,5	385	3149,3	4419,8	0,361	1,4	0,044
Грузовой 4500	9707,5	385	4307,3	5684,7	0,444	1,32	0,04
Грузовой 7100	13970	577,5	6040,4	7961	0,422	1,32	0,041
Пригород	4730	55	985,5	1362,7	0,208	1,37	0,012

ТАБЛИЦА 3

Наименование	S_{max} , кВА	S_{min} , кВА	S_c , кВА	$S_{ск}$, кВА	k_z	k_f	k_p
Грузовой 3000	9762,5	495	3573,5	4971,5	0,366	1,39	0,051
Грузовой 4500	10917,5	495	4773,3	6314	0,437	1,32	0,045
Грузовой 7100	15620	742,5	7021	9076	0,449	1,29	0,048
Пригород	5940	82,5	1159,2	1585,5	0,195	1,37	0,014

Заключение

Таким образом, была создана модель, позволяющая считывать токовую нагрузку из текстового файла формата .txt и преобразовывать ее в эквивалентные значения сопротивления и мощности. Это позволит в дальнейшем с большей достоверностью создавать модели системы тягового электроснабжения в SimInTech [11–15].

Модель также позволяет проводить статистический анализ графиков нагрузки на «прямолинейность» по ключевым коэффициентам — формы, заполнения, равномерности. Для проверки корректности работы модели были проанализированы пять нагрузок, одна из которых представляла собой неизменную во времени. Произведенные расчеты позволили сравнить между собой несколько различных графиков нагрузки ЭПС. Они показали, что наиболее прямолинейные графики имеют поезд массой 7100 т и 4500 т, а наименее — пригородного поезда. Однако стоит отметить, что текущих данных для полноценного анализа недостаточно, поскольку сравнение произ-

водилось на одном участке. Для более детальных выводов стоит провести моделирование на участках с различным профилем пути.

Список источников

1. Комяков А. А., Шкулов А. И., Бартель Л. А. Имитационное моделирование динамических процессов в системе тягового электроснабжения // Известия Транссиба. 2023. № 2 (54). С. 16–29.
2. Пиляев В. С., Гуков П. О. Моделирование систем электроснабжения с помощью программы SimInTech // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 72-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов. Ч. I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2021. С. 223–226.
3. Митрофанов Н. В., Пиляев С. Н. Моделирование системы электроснабжения в программе SimInTech // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 72-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов. Ч. I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2021. С. 502–505.

4. Герман Л. А., Кишкурно К. В. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог // *Электричество*. 2014. № 9. С. 23–34.
5. Герман Л. А., Герман В. Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока: монография. М.: МГУПС, 2014. 173 с.
6. Совершенствовать регулирование напряжения на тяговых подстанциях / Л. А. Герман [и др.] // *Локомотив*. 2012. № 5 (665). С. 45–46.
7. Каландаров Х. У., Михеев Г. М., Ефремов Л. Г. Применение переключающих устройств в электроэнергетике // *Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 11. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. С. 129–138.*
8. Турсунов Д. А., Исмоилов И. К. Анализ вопросов применения устройств регулирования силовых трансформаторов // *Universum. Технические науки: электрон. науч. журн*. 2020. № 8 (77). С. 68–75.
9. Незевак В. Л., Скоков Р. Б., Павлова Р. В. Применение имитационной модели тяговой подстанции постоянного тока для оценки качества электроэнергии // *Известия Транссиба*. 2025. № 1 (61). С. 36–48.
10. Куцкий А. П., Овечкин И. С., Галков А. А. Повышение пропускной способности участка Якурим — Киренга для обеспечения тяги сдвоенных электроподвижных составов массой 14200 тонн // *Молодая наука Сибири*. 2022. № 2 (16). С. 137–149.
11. Пышкин А. А., Лесников Д. В. Электроснабжение железных дорог: учебник. Екатеринбург, 2023. 507 с.
12. Худогов И. А., Галков А. А. Автоматическое управление режимами электроэнергетических систем // *Технико-экономические проблемы развития регионов: материалы научно-практической конференции с международным участием. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. С. 227–230.*
13. Справочная система SimInTech (v12.11.2025). URL: <https://help.simintech.ru/> (дата обращения 10.11.2025).
14. Khudonogov I. A., Puzina E. Y., Tuigunova A. G. The Use of "Technical Rigidity" Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability // *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, 2020. Pp. 136–141, DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.
15. Фельдман С. О., Ячкула Н. И. Автоматическое регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока // *Локомотив*. 2013. № 1 (673). С. 46–47.

Дата поступления: 30.11.2025

Решение о публикации: 13.02.2026

Контактная информация:

ГАЛКОВ Александр Андреевич — аспирант;
galkov16@gmail.com

ХУДОГОВ Игорь Анатольевич — д-р техн.
наук, профессор; hudonogovi@mail.ru

An integral model for reading and statistical analysis of traction rolling stock load graphs

A. A. Galkov, I. A. Khudonogov

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

For citation: *Galkov A. A., Khudonogov I. A. An integral model for reading and statistical analysis of traction rolling stock load graphs // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 71–80. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-71-80. (In Russian)*

Abstract

This paper describes a computer model implemented within the SimInTech software package. The model imports traction current load data from the Fazanord and KORTES software packages, converts these signals into equivalent load resistances and consumed power values, and performs a statistical analysis of the resulting time-series load profiles. It was developed to enable simulation of the traction power supply system in SimInTech in operational modes that include factors not previously modelled, such as automatic voltage regulation via an on-load voltage regulator (OLVR). However, traction load modelling is a labor-intensive and complex process. Therefore, validated outputs from Fazanord and KORTES were used to supply traction load inputs. The described programmes export traction calculation results to a .txt file, which is subsequently imported into SimInTech. During these computations, a statistical analysis of load-curve uniformity was also performed. The model was constructed using standard SimInTech blocks alongside programmable blocks, where the conditions and formulas required for the computations were implemented in a proprietary scripting language. Multiple computational scenarios were performed within the model, including a trial run to assess the accuracy of its calculations. The created model functions as an intermediate tool for addressing issues related to improving the performance and extending the service life of on-load voltage regulators operating automatically in traction-power supply systems. **Objective:** to develop a model in the SimInTech software package capable of converting traction load-current values from the KORTES and Fazanord software packages into equivalent resistance and power values for subsequent use in modelling and statistical analysis. **Results:** a computer model was created in the SimInTech software package that receives current load values from .txt files and converts them into equivalent resistance values. The model also computes key performance metrics that can be utilized to describe the load curve's homogeneity. **Practical significance:** the computer model provides statistical analysis of the load curve and allows current load to be converted into resistance for further use in modelling dynamic traction power supply systems.

Keywords: statistical analysis, load curve, traction power supply, computer modelling, SimInTech, KORTES, traction calculation

References

1. Komyakov A.A., Shkulov A.I., Bartel' L.A. Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya // Izvestiya Transsiba. 2023. No. 2 (54). S. 16–29. (In Russian)
2. Pilyaev V.S., Gukov P.O. Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya s pomoshch'yu programmy SimInTech // Molodezhnyj vektor razvitiya agrarnoj nauki: materialy 72-j natsional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i magistrantov. Ch. I. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni imperatora Petra I, 2021. S. 223–226. (In Russian)
3. Mitrofanov N.V., Pilyaev S.N. Modelirovanie sistemy elektrosnabzheniya v programme SimInTech // Molodezhnyj vektor razvitiya agrarnoj nauki: materialy 72-j natsional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i magistrantov. Ch. I. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni imperatora Petra I, 2021. S. 502–505. (In Russian)
4. German L.A., Kishkurno K.V. Regulirovanie napryazheniya v tyagovoj seti peremennogo toka zhelezykh dorog // Elektrichestvo. 2014. No. 9. S. 23–34. (In Russian)
5. German L.A., German V.L. Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoj seti peremennogo toka: monografiya. M.: MGUPS, 2014. 173 s. (In Russian)
6. Sovershenstvovat' regulirovanie napryazheniya na tyagovykh podstantsiyakh / L.A. German [i dr.] // Lokomotiv. 2012. No. 5 (665). S. 45–46. (In Russian)
7. Kalandarov Kh.U., Mikheev G.M., Efremov L.G. Primenenie pereklyuchayushchikh ustroystv v elektroenergetike // Regional'naya energetika i elektrotehnika: problemy i resheniya: sb. nauch. tr. Vyp. 11. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2015. S. 129–138. (In Russian)
8. Tursunov D.A., Ismoilov I.K. Analiz voprosov primeneniya ustroystv regulirovaniya silovykh transformatorov // Universum. Tekhnicheskie nauki:

elektron. nauch. zhurn. 2020. No. 8 (77). S. 68–75. (In Russian)

9. Nezevak V.L., Skokov R.B., Pavlova R.V. Primenenie imitatsionnoj modeli tyagovoj podstantsii postoyannogo toka dlya otsenki kachestva elektroenergii // *Izvestiya Transsiba*. 2025. No. 1 (61). S. 36–48. (In Russian)

10. Kutsyj A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Povyshenie propusknoj sposobnosti uchastka Yakurim — Kirenga dlya obespecheniya tyagi sdvoennykh elektropodvizhnykh sostavov massoj 14200 tonn // *Molodaya nauka Sibiri*. 2022. No. 2 (16). S. 137–149. (In Russian)

11. Pyshkin A.A., Lesnikov D.V. *Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog: uchebnik*. Ekaterinburg, 2023. 507 s. (In Russian)

12. Khudonogov I.A., Galkov A.A. Avtomaticheskoe upravlenie rezhimami elektroenergeticheskikh sistem // *Tekhniko-ekonomicheskie problemy razvitiya regionov: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Irkutsk: Irkutskij natsional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet, 2024. S. 227–230. (In Russian)

13. Spravochnaya sistema SimInTech (v12.11.2025). URL: <https://help.simintech.ru/> (data obrashcheniya 10.11.2025). (In Russian)

14. Khudonogov I.A., Puzina E.Y., Tuigunova A.G. The Use of “Technical Rigidity” Indices to Assess Climatic Factors Effects on Power Transformers Reliability // *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, 2020, Pp. 136–141, DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.

15. Fel'dman S.O., Yachkula N.I. Avtomaticheskoe regulirovanie napryazheniya v tyagovoj seti peremennogo toka // *Lokomotiv*. 2013. No. 1 (673). S. 46–47. (In Russian)

Received: 30.11.2025

Accepted: 13.02.2026

Author's information:

Aleksandr A. GALKOV — Postgraduate Student;
galkov16@gmail.com

Igor' A. HUDONOGOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; hudonogovi@mail.ru

УДК 65.011.8: 629.4.083

Решение задачи выбора мест размещения пунктов удаленного технического обслуживания маневровых локомотивов методом бинарной оптимизации

В. А. Смирнов¹, А. М. Семенов², С. О. Безбородов³

¹ Омский государственный университет путей сообщения, Россия, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

² Общество с ограниченной ответственностью «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий», Россия, 121205, Москва, вн. тер. г. Муниципальный округ Можайский, Большой б-р, 30, стр. 1

³ Российский университет транспорта, Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Смирнов В. А., Семенов А. М., Безбородов С. О. Решение задачи выбора мест размещения пунктов удаленного технического обслуживания маневровых локомотивов методом бинарной оптимизации // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 81–91. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-81-91

Аннотация

Цель: решение актуальной проблемы выбора оптимальных мест размещения пунктов удаленного технического обслуживания (ПТОЛ) маневровых локомотивов на железнодорожном транспорте с применением метода бинарной оптимизации. Обосновывается необходимость внедрения технологии мобильного сервиса в условиях обширной железнодорожной сети России, характеризующейся наличием большого числа станций, сервисных депо и парков тепловозов. Рассматриваются существующие подходы к размещению объектов локомотивного хозяйства, отмечается сложность ручного подбора решений при наличии значительной инфраструктуры и разнородности эксплуатационного парка. **Методы:** математическое моделирование задачи, основанное на методе бинарной оптимизации, позволяющее минимизировать общие затраты на техническое обслуживание и ремонт маневровых локомотивов путем оптимального распределения полевых ПТОЛ. Приведены алгоритм расчета и результаты численного эксперимента на примере сети Горьковской железной дороги, включающего построение графов пересылки тепловозов, определение оптимальных наборов станций для размещения ПТОЛ и оценку изменения затрат при варьировании количества полевых сервисов. **Результаты:** практическое значение результатов заключается в разработке методики, позволяющей повысить эффективность эксплуатации маневровых локомотивов за счет сокращения непроизводительных простоев и расходов на передвижение техники. Полученные выводы имеют важное прикладное значение для предприятий железнодорожного транспорта, занимающихся организацией и управлением ремонтом подвижного состава. **Практическая значимость:** в статье также рассмотрены особенности организации технического обслуживания маневровых локомотивов, включая необходимость учета специфики их эксплуатации на различных участках сети. Приводятся данные о распределении тепловозов по станциям и анализируются возможные сценарии размещения полевых ПТОЛ. Особое внимание уделяется оценке экономической эффективности различных вариантов размещения, что позволяет выбрать оптимальный подход с учетом конкретных условий эксплуатации.

Ключевые слова: система ремонта локомотивов, организация технического обслуживания, организация производства, задача размещения пунктов обслуживания, бинарная оптимизация

Актуальность исследования и постановка задачи

Парк маневровых локомотивов, включая подвижной состав промышленного железнодорожного транспорта, по экспертным оценкам составляет порядка 50 % от общего числа единиц тягового подвижного состава. При этом значительная часть этого парка распределена между многочисленными частными операторами, в числе которых добывающие компании, предприятия первичной переработки сырья, энергетического сектора, тяжелого и среднего машиностроения [1]. Разнородность парка по балансовой принадлежности и кругу решаемых задач создает сложности при выработке единых организационных и технических подходов к повышению эффективности использования маневровых локомотивов в масштабе отрасли. Одним из важнейших направлений повышения эффективности эксплуатации маневровых локомотивов наряду с созданием подвижного состава нового поколения является совершенствование системы технического обслуживания и ремонта с целью сокращения непроизводительных простоев в ожидании ремонта и потерь на передислокацию.

Анализ передового отечественного и зарубежного опыта организации технического обслуживания и ремонта подвижного состава на транспорте в промышленности и сельском хозяйстве показывает, что радикальным способом решения данной проблемы является применение технологии мобильного сервиса в полевых условиях. О практической востребованности данного подхода говорит факт присутствия подразделений мобильного сервиса в структуре большинства ремонтных компаний Европы и США.

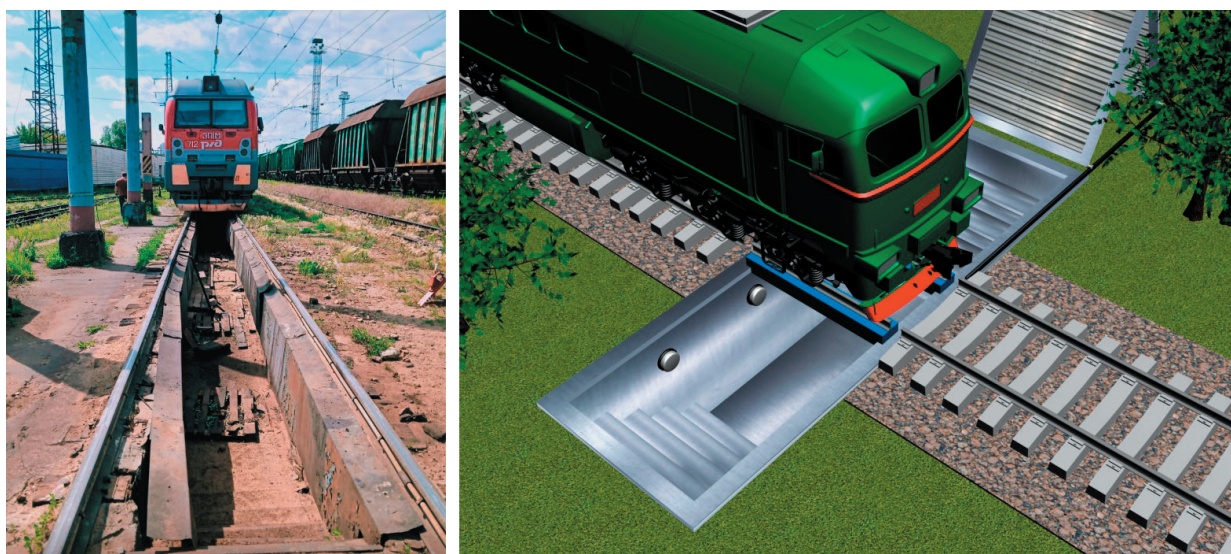
Мобильные ремонтные комплексы, выполненные на автомобильном шасси, позволяют выполнять базовый набор операций по техническому обслуживанию и экипировке тепло-

воза, а также устранению незначительных повреждений на неподготовленных или частично подготовленных позициях [2].

В последнем случае принято говорить о так называемых «полевых ПТОЛ», расположенных, как правило, на путях отстоя подвижного состава и оборудованных минимальным набором технических средств (например, укороченной смотровой канавой) для возможности замены тормозных колодок и обслуживания экипажной части. Выполнение данных операций на неподготовленных позициях (например, на боковых путях станций) крайне затруднительно и неудобно. Типовые проекты стационарных ремонтных позиций на открытых площадках для тепловозов колеи 1520 мм можно найти в соответствующей технической литературе [3]. Один из примеров действующей позиции ТО-2 локомотивов под открытым небом представлен на рис. 1а.

Организация ТО-3, ТО-4 тепловозов в линейных условиях потребует размещения на позиции домкратов для вывешивания колесных пар при вибродиагностировании и мобильного колесотокарного станка для обточка колесных пар. Для установки мобильного колесотокарного станка смотровая канава должна иметь расширенное опорное основание с внешней стороны подошвы рельса, чтобы установить гидравлические домкраты вывешивания колесной пары, и приямки глубиной не менее 100 мм, шириной 200 мм и длиной не менее 600 мм по внешней стороне от головки рельсов для размещения станка.

Перспективный вариант компактной технологической позиции «полевого ПТОЛ» разработан специалистами ООО «НПЦ ПРОМТЕХ» (Москва). Его принципиальным отличием от существующих вариантов являются поперечное исполнение позиции относительно оси пути и наличие встроенного защитного кожуха



а

б

Рис. 1. Варианты исполнения ремонтной позиции «полевого ПТОЛ»:

а – действующая позиция на станции Горький-Московский;

б — 3D-модель перспективного «полевого ПТОЛ» разработки «НПЦ ПРОМТЕХ» (Москва)

от осадков и несанкционированного проникновения на время, когда позиция не используется (рис. 1б).

Для хранения запаса тормозных колодок и несложной технологической оснастки канала может оборудоваться внутренними камерами (нишами). Освещение канала обеспечивается внешней переносной системой, входящей в комплект оборудования мобильного сервиса, или традиционными стационарными светильниками с питанием от внешнего генератора.

Эффективное внедрение технологии мобильного сервиса в условиях разветвленной железнодорожной сети России с большим количеством станций, сервисных депо и ПТОЛ, а также значительным парком тепловозов, распределенным в границах региона, требует решения комплекса сложных организационно-технических задач, одна из которых — выбор и обоснование оптимальной дислокации мест размещения удаленных точек обслуживания — «полевых ПТОЛ».

Выбор метода решения оптимизационной задачи

Известные классические методы оптимизации размещения объектов локомотивного хозяйства строятся на принципах сравнения нескольких рациональных вариантов, составленных с учетом характера вагонопотока и местных условий, т. е. наличия участковых и сортировочной станций [4]. При этом последовательно производится декомпозиция полигона эксплуатации локомотивов с выделением участков обращения, далее исследуются взаимосвязи этих участков с формированием различных комбинаций размещения ПТОЛ. В качестве метода решения используется способ «деления отрезка пополам».

К числу более информативных методов можно отнести создание имитационных моделей транспортных систем на макро- и микроуровне с проведением серии вычислительных экспериментов для различных предварительно сформированных вариантов выбора мест

размещения. В этом случае появляется возможность представления ПТОЛ как элемента единой транспортно-технологической системы в динамике с учетом неравномерности поездопотоков, вероятностного характера работ и других факторов [5]. Недостатком данного подхода является его высокая трудоемкость при увеличении масштаба представляемого объекта.

Особенностями оптимального выбора мест размещения «полевых ПТОЛ» для обслуживания маневровых тепловозов являются:

- решение задачи в условиях фактически сложившейся инфраструктуры ПТОЛ для магистральных локомотивов, принятой в соответствии с классическими подходами, рассмотренными выше (не учитывающими особенности маневровой работы на полигоне);
- значительное количество станций с постоянной маневровой работой, требующих нахождения одного или нескольких тепловозов (в среднем порядка 100 и более) в границах одной железной дороги;
- преобладание станций с малой и средней по интенсивности маневровой работой, на которых эксплуатируется от одного до четырех тепловозов (порядка 85 %).

Выбор оптимального размещения мест удаленного сервиса в таких условиях путем «ручного» перебора рациональных вариантов практически невозможен.

В качестве решения авторами разработана методика выбора оптимального набора мест размещения «полевых ПТОЛ» с использованием метода бинарной оптимизации, в которой переменные ограничены набором значений $\{0, 1\}$.

В общем случае задача бинарной оптимизации может быть сформулирована в следующем виде:

$$\min_{\vec{x}} \left\{ F(\vec{x}) \mid \vec{x} \in \{0, 1\}^n \right\}; \quad (1)$$

$$h(\vec{x}) = 0, g(\vec{x}) > 0,$$

где $F(\vec{x})$ — целевая функция из n переменных со значениями $\{0, 1\}$,

$h(\vec{x}), g(\vec{x})$ — ограничения на значения переменных, обеспечивающие нахождение решения в заданной области допустимых значений [6].

Построение математической модели

Математически железнодорожная сеть может быть задана в виде связного взвешенного графа $G = (V, E)$, в котором множество вершин $V = (1, \dots, n)$ — это железнодорожные станции, а множество ребер $E = \{(i, j)\}$ — множество пар станций, связанных между собой железнодорожным перегоном. Каждому ребру $(i, j) \in E$ приписан вес, равный длине перегона между железнодорожными станциями i и j . Множество ребер E задано с помощью взвешенной матрицы смежности вершин S размера $n \times n$, где n — общее количество железнодорожных станций рассматриваемой железнодорожной сети. Элемент s_{ij} матрицы S равен длине железнодорожного перегона между станциями i и j , если станции связаны перегоном, и нулю в противном случае. При практической реализации модели все множества задаются в виде таблиц соответствующей размерности.

В качестве параметров модели по каждой станции i принимаются:

- 1) $d_i = 0, 1$ — признак наличия на станции сервисного локомотивного депо, производящего ТО-3, ТО-4 и текущий ремонт маневровым тепловозам (отсутствует, присутствует);
- 2) $p_i = 0, 1$ — признак наличия на станции пункта технического обслуживания ТО-2 тепловозов (отсутствует, присутствует);
- 3) $m = (m_{1,i}, \dots, m_{k,i})$ — количество маневровых тепловозов, работающих на станции, по сериям локомотивов $1, \dots, k, k \in Z$.

Размерность k на практике ограничена диапазоном значений от 2 до 5, обеспечивая охват большинства эксплуатируемых на сегодняшний момент серий маневровых тепловозов с учетом исторического разделения парка различных серий по регионам. Например, для Горьковской железной дороги характерными сериями являются ЧМЭЗ, ТЭМ18ДМ ($k = 2$).

Разделение на отдельные параметрические группы основных депо и ПТОЛ позволяет в дальнейшем рассматривать оптимизационные задачи для более глубоких видов технического обслуживания (ТО-3, ТО-4), текущего ТР-1 и внепланового ремонта, традиционно выполняемых в основных депо.

Пусть $V_{depo} \subset V$ — множество станций, на которых есть сеть депо, d — общее количество депо в данной железнодорожной сети. Требуется найти оптимальное расположение $V_{ptol} = \{j_1, \dots, j_p\}$ «полевых ПТОЛ» ($1 \leq p \leq 10$). Под оптимальностью понимается минимум годовых суммарных затрат на плановое техническое обслуживание и ремонт маневровых локомотивов в границах железной дороги.

Годовые суммарные затраты на техническое обслуживание и ремонт маневровых локомотивов на станции зависят от кратчайшего расстояния по железнодорожной сети от данной станции до ближайшего депо или ПТОЛ, количества локомотивов на данной станции и других факторов. Для постановки задачи оптимизации расположения «полевых ПТОЛ» требуется оценка затрат r_{ij} обслуживания локомотивов со станции i на станции j .

Обозначим через d_{ij} кратчайшее расстояние по железнодорожной сети от станции i до станции j и через m_i количество маневровых локомотивов всех серий на станции i . Если допустить равенство норм периодичности и затрат на техническое обслуживание для различных

серий маневровых тепловозов, суммарные годовые затраты составят:

$$r_{ij} = c \cdot m_i d_{ij} + q, \quad (2)$$

где c — коэффициент, учитывающий удельные затраты на ТО и его периодичность;

q — условно-постоянные затраты на инфраструктурное обеспечение и организацию технического обслуживания тепловозов (содержание зданий и сооружений локомотивного хозяйства и т. п.).

Если расположение «полевых ПТОЛ» V_{ptol} задано, то локомотивы со станции i будут обслуживаться в депо или ПТОЛ на станции j с минимальным расстоянием d_{ij} . Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом. Требуется выбрать расположение V_{ptol} «полевых ПТОЛ» так, чтобы минимизировать суммарное расстояние на передислокацию локомотивов по всем станциям для проведения одного ТО.

Переменные задачи:

$x_j \in \{0, 1\}$ — бинарная переменная, где $x_j = 1$, если на станции j есть депо или расположен «полевой ПТОЛ», и $x_j = 0$ в противном случае;

$y_{ij} \in \{0, 1\}$ — бинарная переменная, где $y_{ij} = 1$, если локомотивы со станции i будут обслуживаться на станции j , и $y_{ij} = 0$ в противном случае.

Целевая функция:

$$\sum_{i,j=1}^n r_{ij} y_{ij} \rightarrow \min, r_{ij} = m_i d_{ij} \quad (3)$$

при условиях:

1. Для каждой станции $i = 1, \dots, n$ однозначно определено место обслуживания ее маневровых локомотивов: $\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1$.

2. Локомотивы могут обслуживаться только в сервисном депо, ПТОЛ или на «полевом ПТОЛ»:

$$y_{ij} \leq x_j, j \in V_{depo}, i, j = 1, \dots, n.$$

3. Выбрано ровно p «полевых ПТОЛ»:

$$\sum_{j=1}^n x_j = p + d. \quad (4)$$

4. Определены станции, на которых есть депо и стационарные ПТОЛ:

$$x_j = 1, j \in V_{\text{депо}}.$$

5. Отсутствуют ограничения по производительности ПТОЛ и депо.

Последнее допущение для маневровых локомотивов вполне оправдано ввиду относительно малого количества обслуживаний в день и возможности достаточно точной синхронизации плана постановки тепловозов на ТО-2, ТО-3, так как они планируются по календарной наработке [7].

Результаты вычислительного эксперимента

В качестве объекта моделирования рассматривался замкнутый полигон эксплуатации маневровых тепловозов в границах Горьковской железной дороги. Математически данная сеть представлена в виде маршрутной матрицы размером 87×87 . Численные значения длин перегонов приняты по данным открытых интернет-источников [8, 9].

В качестве параметров модели были заданы:

- 1) общее количество станций $n = 87$;
- 2) число маневровых тепловозов и их распределение по станциям в границах железной дороги;
- 3) количество ПТОЛ, в том числе в основных депо $V_{\text{депо}}$ — 14;
- 4) длины перегонов между станциями, км;
- 5) места размещения стационарных ПТОЛ и ремонтных депо на станциях;
- 6) количество «полевых ПТОЛ» $V_{\text{птол}} = 1, \dots, 10$;
- 7) виды технического обслуживания — ТО-2, ТО-3.

Расчеты производились в системе MATLAB для $V_{\text{птол}} = 1, \dots, 10$ с шагом 1. По каждому варианту в соответствии с заданной целевой функцией программой был определен оптимальный набор станций для размещения «полевых ПТОЛ» и рассчитана суммарная дальность передислокации локомотивов на единицу ТО.

Визуальная интерпретация развернутого графа пересылки тепловозов от станций маневровой работы к местам проведения ТО-2 представлена на рис. 2.

В табл. 1 представлены оптимальные наборы станций размещения «полевых ПТОЛ» в количестве от 1 до 10 при выполнении в полевых условиях цикла ТО-2 тепловозов.

По полученным данным можно выявить следующую закономерность: каждый последующий набор станций для размещения «полевых ПТОЛ» включает в себя все станции предыдущего набора:

$$V_{\text{птол}}^p = \{j_1, \dots, j_p\} \subset V_{\text{птол}}^{p-1} = \{j_1, \dots, j_{p-1}\}. \quad (5)$$

На практике это означает возможность поэтапного ввода в эксплуатацию отдельных «полевых ПТОЛ» с постепенным наращиванием их количества. В последней строке таблицы приводятся относительные значения дальности передислокации тепловозов на ТО-2 для каждого из вариантов по сравнению с базовым (без «полевых ПТОЛ»).

Можно отметить явно нелинейный характер зависимости снижения затрат на передислокацию в первой трети диапазона вариаций количества «полевых ПТОЛ» ($m = 1, \dots, 3$) со снижением показателя совокупной протяженности маршрутов на одно ТО на 12%, 11%, 6% соответственно на каждый «полевой ПТОЛ». Далее данный показатель снижается и остается практически неизменным на уровне 4%.

ТАБЛИЦА 2. Оптимальные наборы станций размещения «полевых ПТОЛ» при организации ТО-3, полученные в результате расчетов

Станции размещения «полевых ПТОЛ»	Общее количество «полевых ПТОЛ» для ТО-3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Агрыз	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Яр		+	+	+	+	+	+	+	+	+
Владимир			+	+	+	+	+	+	+	+
Мураши				+	+	+	+	+	+	+
Шахунья					+	+	+	+	+	+
Пинюг						+	+	+	+	+
Чебоксары							+	+	+	+
Сергач								+	+	+
Йошкар-Ола									+	+
Нуя										+
Относительная дальность пересылки тепловозов на ТО-3, %	58	49	43	38	33	31	29	27	25	23

Аналогичные расчеты при планировании организации ТО-3 тепловозов в полевых условиях дают следующие результаты (табл. 2). При моделировании принято восемь станций с возможностью проведения ТО-3 в стационарных условиях: Арзамас II, Горький-Сортировочный, Канащ, Киров, Красноуфимск, Лян-гасово, Муром, Юдино.

Анализируя оптимальные наборы станций для размещения полевых ПТОЛ (табл. 1, 2), можно отметить наличие несовпадений, что обусловлено различным количественным набором базовых мест проведения ТО-2 и ТО-3 (действующих депо и ПТОЛ): в первом расчетном случае $V_{depo} = 14$, во втором $V_{depo} = 8$. График относительного совпадения оптимальных наборов станций размещения «полевых ПТОЛ» для организации ТО-2 и ТО-3 маневровых тепловозов представлен на рис. 3.

Можно заметить, что в первой половине интервала моделирования $V_{ptol} = 1, \dots, 5$ оптимальные наборы станций для проведения ТО-2 и ТО-3 тепловозов существенно отличаются друг от друга. Положение меняется при увеличении количества «полевых ПТОЛ» до шести и более. В этом случае расчетное число совпадений в наборах составляет 50–70%. Максимум совпадений (80%) достигается при числе «полевых ПТОЛ» равном 10. Оставшиеся несовпадающие наборы станций (Агрыз, Владимир и Янаул, Вятские Поляны), за исключением станции Владимир, находятся в радиусе 80 км друг от друга.

Примечательно, что на 75% станций, выбранных в результате решения оптимизационной задачи для размещения «полевых ПТОЛ», ранее в СССР располагались оборотные локомотивные депо или ПТОЛ [10]. То есть на этих станциях гипотетически уже присутствует

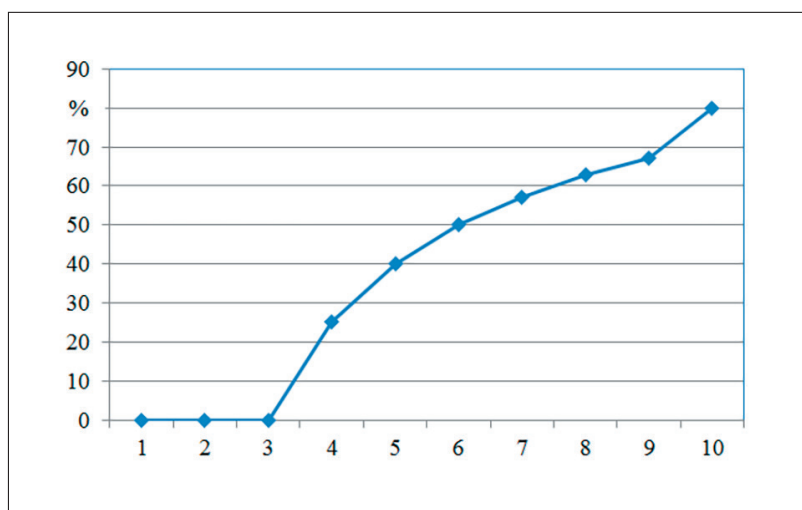


Рис. 3. Процент совпадений оптимальных наборов станций при организации ТО-2 и ТО-3

необходимая технологическая инфраструктура для проведения технического обслуживания тепловозов.

Окончательный выбор предпочтительного варианта по количеству «полевых ПТОЛ» и их производственно-технологическим возможностям (ТО-2, ТО-3) в диапазоне интервала моделирования $V_{ptol} = 1, \dots, 10$ должен производиться по критериям экономической эффективности с учетом стоимости оснащения «полевых ПТОЛ», вложений в приобретение и содержание мобильных «депо на колесах», стоимости топлива и заработной платы бригады, величины упущенной выгоды компании от нахождения тепловоза в нерабочем парке [10, 11].

Список источников

1. Аношкин Д.С. Взаимная тяга // Газета «Гудок». URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1654849> (дата обращения: 12.11.2025).
2. Смирнов В.А., Безбородов С.О. Анализ современных технических средств и технологий мобильного сервиса подвижного состава в России и за рубежом // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги по-

ездов: сборник научных трудов по материалам VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Омск: ОмГУПС, 2024. С. 363–368.

3. Типовой проект смотровых канав для локомотивов на приемоотправочных пунктах. Вариант из монолитного бутобетона: рабочие чертежи. М., 1958. 10 л.
4. Локомотивное хозяйство / С.Я. Айзинбуд [и др.]; под ред. С.Я. Айзинбуда. М.: Транспорт, 1986. 262 с.
5. Смирнов В.А. Моделирование перевозочного процесса и систем обслуживания подвижного состава на железнодорожном транспорте // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. №2. С. 13–18.
6. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты / Б.А. Березовский [и др.]. М.: Наука, 1989. 128 с.
7. О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД»: распоряжение от 30.12.2016 № 2796р (с изм. от 21.09.2018 № 2070р). М.: ОАО «РЖД», 2018.
8. Карты железных дорог России // Трудовой десант. Строительство железных дорог. URL:

<https://www.tdesant.ru/uploads/images/maps/Горьковская%20железная%20дорога.jpg> (дата обращения: 12.11.2025)

9. Суперкарта железных дорог 2.0 // Суперкарта железных дорог. URL: <https://supermap.zatramvaj.su/> (дата обращения: 12.11.2025)

10. Хасин Л.Ф. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте. М.: МПС РФ, 1998.

11. Матвеев А.Н. Экономика, организация и управление локомотивным хозяйством. М.: Желдориздат, 2002.

Дата поступления: 20.01.2026

Решение о публикации: 13.02.2026

Контактная информация:

СМИРНОВ Виктор Александрович — д-р техн. наук, доцент;

SmirnovVA@bk.ru

СЕМЕНОВ Александр Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент;

almsemenov@mail.ru

БЕЗБОРОДОВ Станислав Олегович — аспирант; stan34915@yandex.ru

Binary optimization method to choose locations for remote maintenance of shunting locomotives

V. A. Smirnov¹, A. M. Semenov², S. O. Bezborodov³

¹Omsk State Transport University, 35 Marksa pr., Omsk, 644046, Russia

²International Center for Quantum Optics and Quantum Technologies LLC, Build. 1, 30 Bolshoy blvd., Vn. ter. g. Mozhaysky Municipal District, Moscow, 121205, Russia

³Russian University of Transport, 9 Obraztsova Street, Moscow, 127994, Russia

For citation: *Smirnov V.A., Semenov A.M., Bezborodov S.O.* Binary optimization method to choose locations for remote maintenance of shunting locomotives // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 81–91. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-81-91. (In Russian)

Abstract

Objective: this research addresses the pressing task of determining optimal sites for remote maintenance of shunting locomotives within railway transport framework by applying a binary optimization method. The rationale for adopting mobile maintenance technologies is justified in the context of Russia's extensive railway network, which comprises a large number of stations and service depots, as well as diverse fleets of diesel locomotives. This research reviews existing approaches to locating locomotive facilities and highlights the complexity of manually selecting solutions in the presence of substantial infrastructure and the diversity of the operational fleet. **Methods:** a mathematical model employing binary optimization method is developed to minimize the total costs of maintenance and repair through efficient distribution of locomotive field maintenance centres. The findings of a numerical experiment conducted on the Gorky Railway network are presented in this study along with a calculation algorithm. The study also includes the construction of transfer graphs for diesel locomotives, identifying the optimal stations for locomotive field maintenance placement and an assessment of cost dynamics associated with varied field services. **Results:** a methodology has been developed to improve the efficiency of shunting locomotive operations by reducing non-productive downtime and the costs associated with transportation of machines. The conclusions obtained have significant practical implications for railway transport companies engaged in the planning and management of rolling stock repair and maintenance. **Practical significance:** this paper also discusses the organization of maintenance for shunting locomotives, highlighting the need to account for their operational specificities across sections of the network. Data on the distribution of diesel locomotives

across stations are presented and potential scenarios for field maintenance placement of locomotives are analyzed. Particular attention is devoted to the assessment of the economic efficiency of alternative placement options, which enables selection of the optimal approach given specific operating conditions.

Keywords: locomotive repair system, organization of maintenance, production management, service point placement, binary optimization

References

1. Anoshkin D.S. Vzaimnaya tyaga // Gazeta "Gudok". URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1654849> (data obrashcheniya: 12.11.2025). (In Russian)
2. Smirnov V.A., Bezborodov S.O. Analiz sovremennykh tekhnicheskikh sredstv i tekhnologij mobil'nogo servisa podvizhnogo sostava v Rossii i za rubezhom // Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: sbornik nauchnykh trudov po materialam VIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Omsk: OmGUPS, 2024. S. 363–368. (In Russian)
3. Tipovoj proekt smotrovykh kanav dlya lokomotivov na priemootpravochnykh punktakh. Variant iz monolitnogo butobetona: rabochie chertezhi. M., 1958. 10 l. (In Russian)
4. Lokomotivnoe khozyajstvo / S.Ya. Ajzinbud [i dr.]; pod red. S. Ya. Ajzinbuda. M.: Transport, 1986. 262 s. (In Russian)
5. Smirnov V.A. Modelirovanie perevozochного protsessa i sistem obsluzhivaniya podvizhnogo sostava na zheleznodorozhnom transporte // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2012. №2. S. 13–18. (In Russian)
6. Mnogokriterial'naya optimizatsiya: Matematicheskie aspekty / B. A. Berezovskij [i dr.]. M.: Nauka, 1989. 128 s. (In Russian)
7. O sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov OAO "RZhD": rasporyazhenie ot 30.12.2016 № 2796r (s izm. ot 21.09.2018 №2070r). M.: OAO "RZhD", 2018. (In Russian)
8. Karty zheleznykh dorog Rossii // Trudovoj desant. Stroitel'stvo zheleznykh dorog. URL: <https://www.tdesant.ru/uploads/images/maps/Gor'kovskaya%20zheleznaya%20doroga.jpg> (data obrashcheniya: 12.11.2025). (In Russian)
9. Superkarta zheleznykh dorog 2.0 // Superkarta zheleznykh dorog. URL: <https://supermap.zatramvaj.su/> (data obrashcheniya: 12.11.2025) (In Russian)
10. Khasin L.F. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke investitsionnykh proektov na zheleznodorozhnom transporte. M.: MPS RF, 1998. (In Russian)
11. Matveev A.N. Ekonomika, organizatsiya i upravlenie lokomotivnym khozyajstvom. M.: Zheldorizdat, 2002. (In Russian)

Received: 20.01.2026

Accepted: 13.02.2026

Author's information:

Victor A. SMIRNOV— D. Sci. in Engineering, Associate Professor;

SmirnovVA@bk.ru

Aleksandr M. SEMENOV— PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor;

almsemenov@mail.ru

Stanislav O. BEZBORODOV— Postgraduate Student; stan34915@yandex.ru

УДК 621.3.019.34

Анализ отказов тягового электрооборудования на скоростных электропоездах постоянного тока серии ЭС104 «Финист»

В. О. Иващенко, А. В. Шелагуров

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

Для цитирования: Иващенко В. О., Шелагуров А. В. Анализ отказов тягового электрооборудования на скоростных электропоездах постоянного тока серии ЭС104 «Финист» // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 92–100. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-92-100

Аннотация

Цель: в 2025 году началась регулярная эксплуатация скоростных электропоездов серии ЭС104 с асинхронным тяговым приводом на участках обслуживания Октябрьской железной дороги. В ходе эксплуатации был выявлен ряд отказов тягового электрооборудования, а именно асинхронных тяговых электродвигателей и тяговых преобразователей. В статье рассматриваются виды и причины возникновения отказов асинхронного тягового привода, выявленных в течение шести месяцев эксплуатации электропоездов серии ЭС104 на Октябрьской железной дороге на основании данных их технического обслуживания и ремонта. **Методы:** проведенное исследование включает в себя анализ неисправностей асинхронного тягового привода электропоездов серии ЭС104, которые, в свою очередь, привели к отказам асинхронных тяговых двигателей и тяговых преобразователей. **Результаты:** было установлено, что отказы асинхронных тяговых двигателей обусловлены проблемами изоляции их статорной обмотки, что приводило к неисправностям, таким как снижение сопротивления статорной обмотки относительно корпуса тягового двигателя, межфазное замыкание статорной обмотки тягового двигателя, обрыв фазы статорной обмотки тягового двигателя. Отказы тяговых преобразователей главным образом связаны с неисправностями тягового контроллера или контроллера тормозного регулятора. Данные факты свидетельствуют о необходимости повышения качества при производстве данного электрооборудования с целью повышения его надежности. В результате исследования разработаны рекомендации по устранению выявленных неисправностей. **Практическая значимость:** результаты работы имеют значение для совершенствования технологии производства и ремонта силового электрооборудования электрического подвижного состава, так как затрагивают основную проблему, возникающую при эксплуатации современных скоростных электропоездов серии ЭС104, связанную с систематическими отказами асинхронных тяговых двигателей и тяговых преобразователей.

Ключевые слова: электропоезд ЭС104, отказ, тяговое электрооборудование, тяговый электродвигатель, статорная обмотка, тяговый преобразователь, система управления электропоездом, тяговый контроллер, тормозной регулятор

Введение

В 2023 году машиностроительным заводом «Уральские локомотивы» организовано производство скоростных электропоездов постоянного тока типа «Электропоезд пригородный экспресс (ЭПЭ)» серии ЭС104 «Фи-

нист» (рис. 1), разработанной на основе снятой с производства серии электропоездов постоянного тока ЭС2Г «Ласточка» [1]. Производство тягового электропривода для ЭС2Г реализовывала немецкая компания Siemens совместно с предприятием «Уральские локомотивы»,



Рис. 1. Электропоезд ЭС104. Фото: Lordbat116/TrainFoto

используя передовые зарубежные технологии машиностроения [2]. В отличие от предшественника, электропоезд ЭС104 обладает тяговым оборудованием отечественного производства, способным обеспечить быстрый разгон до 160 км/ч, что считается его главным преимуществом [3].

Кроме того, на электропоездах новой серии изменено расположение части электрооборудования в вагонах по сравнению с ЭС2Г, где тяговое оборудование расположено в головных и моторных промежуточных вагонах без токоприемника (при составности более шести вагонов). На ЭС104 тяговый привод установлен на промежуточные вагоны с токоприемником (рис. 2), а расположение электрического оборудования на головных и прицепных промежуточных вагонах идентично [4].

Виды отказов тягового электрооборудования электропоездов ЭС104

На участках обслуживания Октябрьской железной дороги — филиала ОАО «РЖД» первый электропоезд серии ЭС104 № 038 приступил к регулярной эксплуатации с пассажирами

1 мая 2025 года. За первые 6 месяцев эксплуатации электропоездов выявлен 41 случай отказов тягового оборудования, из них по причине неисправности тягового электродвигателя (далее — ТЭД) произошло 27 случаев, по причине неисправности тягового преобразователя (далее — ТП) — 14 случаев.

Рассмотрим виды зарегистрированных отказов тягового оборудования на пяти электропоездах ЭС104, эксплуатирующихся на Октябрьской железной дороге, в течение первых 6 месяцев работы.

1. Неисправность ТЭД:

- 1) снижение сопротивления статорной обмотки относительно корпуса ТЭД — 23 случая;
- 2) межфазное замыкание статорной обмотки ТЭД — 3 случая;
- 3) обрыв фазы статорной обмотки ТЭД — 1 случай.

2. Неисправность ТП:

- 1) неисправность драйвера — 1 случай;
- 2) неисправность резисторов предзаряда — 1 случай;
- 3) неисправность силового модуля инвертора — 1 случай;

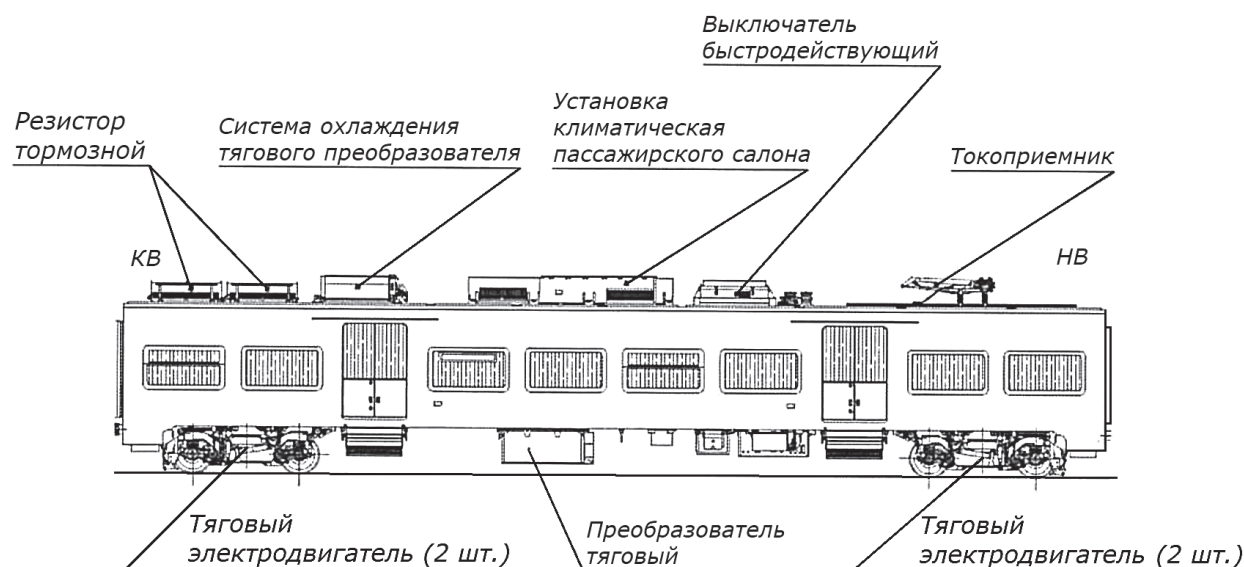


Рис. 2. Расположение электрооборудования на моторном вагоне электропоезда ЭС104

- 4) потеря связи с тяговым контроллером — 3 случая;
- 5) неисправность тягового контроллера или контроллера тормозного регулятора — 7 случаев;
- 6) неисправность источника питания датчика давления охлаждающей жидкости — 1 случай.

Рассмотрим назначение и устройство ТЭД, применяемых на электропоездах ЭС104. Тяговый электродвигатель предназначен для преобразования электрической энергии в механическую, затрачиваемую на движение электропоезда. На данном типе подвижного состава в качестве ТЭД применяются шестиполусные асинхронные трехфазные электрические машины с короткозамкнутым ротором и самовентилиацией (рис. 3). Двигатель получает питание от тягового преобразователя электропоезда, через тяговый редуктор вращающий момент передается от двигателя к колесной паре электропоезда. Основными элементами ТЭД, в которых происходит преобразование энергии, являются статор и ротор, разделенные воздушным зазором [5].

Обмотка короткозамкнутого ротора выполнена в виде «беличьей клетки»: состоит из медных стержней, замкнутых накоротко с торцов сердечника ротора двумя бронзовыми кольцами. С точки зрения электротехники «беличья клетка» представляет собой многофазную обмотку, соединенную в звезду и замкнутую накоротко. Стержни этой обмотки вставлены в пазы сердечника ротора. Сердечник ротора напрессован на вал двигателя и состоит из листов электротехнической стали (ГОСТ 21427.2) с термостойким электроизоляционным покрытием [6].

Статор (рис. 3, поз. 1) — неподвижная часть ТЭД — представляет собой пакет изолированных листов из электротехнической стали (сердечник), запрессованный в корпус в неразборный блок. Трехфазная обмотка статора (рис. 3, поз. 7), которая подключается к электрической сети, помещена в пазы пакета пластин, они закрываются пазовыми клиньями. Коммутирующие концы катушек, коммутационные соединения статора и присоединительные выводные шины плотно спаяны друг с другом. Обмотка

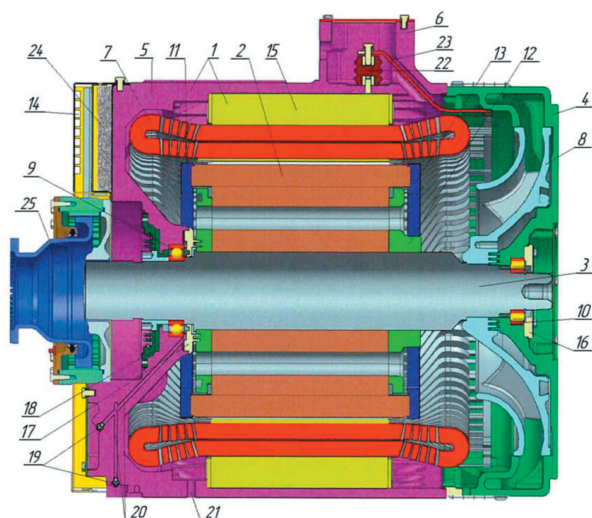


Рис. 3. Расположение основных элементов тягового электродвигателя: 1 — статор; 2 — ротор; 3 — вал ротора; 4 — подшипниковый щит; 5 — станина; 6 — коробка выводов; 7 — обмотка статора; 8 — вентилятор; 9 — шарикоподшипник; 10 — роликовый подшипник; 12 — упорная шайба; 11, 13 — короткозамыкающие кольца; 14 — воздухозаборная решетка; 15 — сердечник статора; 16 — крышка подшипника (сторона НП); 17 — крышка подшипника (внутренняя); 18 — крышка подшипника (наружная); 19 — масленка; 20 — масляный канал; 21 — отверстие для слива конденсата; 22 — изолятор; 23 — фазная шина; 24 — фильтровальное полотно; 25 — полумуфта

статора двигателя выполнена с соединением трех фаз в глухую звезду с изолированной нейтралью. Обмотки вместе со всеми коммутационными соединениями объединены в неразборный блок посредством вакуумной пропитки. Если обмотка статора или выводное соединение имеют повреждения, то обмотка в сборе полностью заменяется, ее частичный ремонт невозможен [4, 7, 8].

На моторные вагоны электропоездов ЭС104 приписки Октябрьской железной дороги установлены двигатели асинхронные тяговые ДАТ-330У1 производства АО «ПТФК «ЗТЭО». Установлено, что все отказы ТЭД на электропоездах данной локации связаны с неисправностями статорной обмотки.

Рассмотрим причины неисправностей статорной обмотки, которые привели к отказам ТЭД при эксплуатации электропоездов ЭС104 на полигоне Октябрьской железной дороги.

1. Снижение сопротивления статорной обмотки относительно корпуса ТЭД. Снижение сопротивления изоляции обмоток должно быть не менее 20 МОм в холодном состоянии, не менее 5 МОм в нагретом состоянии, не менее 3 МОм после сушки увлажненной изоляции [8]. Возникновение данной неисправности в рассматриваемых случаях отказов ТЭД было обусловлено пробоем изоляции обмотки статора на корпус ТЭД, в результате чего ее сопротивление снижалось до 0, что, в свою очередь, приводило к аварийному режиму работы ТЭД с его последующим отказом. Причины данной неисправности связаны с нарушениями в технологии сборки ТЭД и в процедуре пропитки статора при производстве, что могло способствовать попаданию влаги, грязи внутрь двигателя, значительному перегреву обмоток статора при нарушении вентиляции или перегрузках двигателя, механическому повреждению изоляции.

2. Межфазное замыкание статорной обмотки ТЭД. Обусловлено механическим разрушением изоляции обмотки статора, в результате чего происходил ее пробой на корпус ТЭД. Причины и последствия короткого замыкания между статорной обмоткой и корпусом ТЭД рассмотрены в п. 1.

3. Обрыв фазы статорной обмотки ТЭД. Возможные причины: нарушение изоляции

статорных обмоток, ослабление креплений шинных перемычек, межкатушечных перемычек и выводных шин. В результате в одной фазе статора при поданном напряжении электрический ток отсутствует, двигатель при пуске вращается рывками, с гудящим шумом [8].

Так как в результате одной из перечисленных неисправностей ТЭД выходит из строя, то с целью нормализации работы тягового привода производится замена отказавшего двигателя на новый исправный модели ДАТ-330У1 производства АО «ПТФК «ЗТЭО».

Рассмотрим назначение и устройство тяговых преобразователей, применяемых на электропоездах ЭС104. Тяговый преобразователь осуществляет преобразование напряжения 3 кВ постоянного тока в трехфазное переменное напряжение регулируемой амплитуды и частоты с целью питания асинхронных тяговых электродвигателей [4, 9]. На электропоездах серии ЭС104 применяется тяговый преобразователь «ПТ-Восток» (ЕГРЦ.435552.001) [4]. Данное устройство выполняет ряд функций, таких как питание ТЭД и управление ими с помощью команд, получаемых от системы управления электропоезда посредством двух независимых каналов; возврат электрической энергии, создаваемой тяговыми двигателями в режиме электродинамического торможения (далее — ЭДТ), в контактную сеть (при рекуперации) или ее передача на тормозные резисторы (при реостатном торможении), в том числе при отключении быстродействующего выключателя (БВ) в процессе ЭДТ; питание двух преобразователей собственных нужд (далее — ПСН) постоянным напряжением в диапазоне от 2200 до 4000 В [4].

На электропоезде ЭС104 ТП установлены под кузовами моторных вагонов. Их конструктивное исполнение позволяет размещать все составные части в одном контейнере (рис. 4) [4, 10].

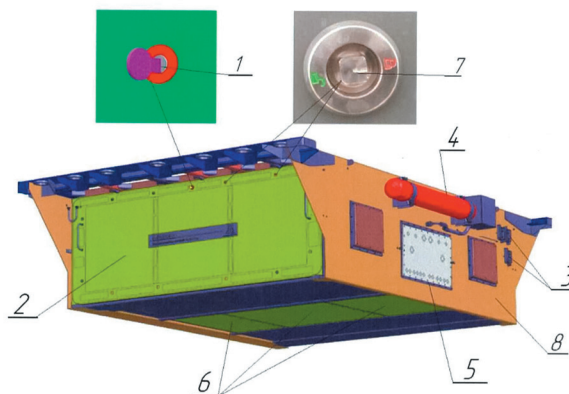


Рис. 4. Общий вид тягового преобразователя:

1 — специальный ключ; 2 — смотровой люк отсека А; 3 — низковольтные разъемы XI, X2, X3; 4 — модуль пожаротушения; 5 — кабельная плата; 6 — смотровые люки отсека В; 7 — замки под четырехгранный ключ; 8 — передняя стенка [4]

В состав рассматриваемого тягового преобразователя входят два контура, которые осуществляют передачу электрической энергии к потребителям по шести каналам. Контур 1 включает в себя канал № 1, предназначенный для питания первого и второго ТЭД, канал № 3, предназначенный для подключения тормозного резистора 1, и канал № 5, предназначенный для питания ПСН 1. Контур 2 включает в себя канал № 2, предназначенный для питания третьего и четвертого ТЭД, канал № 4, предназначенный для подключения тормозного резистора 2, и канал № 6, предназначенный для питания ПСН 2. Данные контуры питания работают автономно. В случае неисправности одного из основных элементов (кроме системы охлаждения) работоспособность данного ТП сохраняется, но с меньшей мощностью [4].

Тяговый преобразователь «ПТ-Восток» (ЕГРЦ.435552.001) функционально делится на несколько групп: контейнер, силовые контакторы, устройство предварительного заряда конденсаторов, два дросселя, панели

конденсаторов фильтрации входного напряжения, тяговый инвертор, тормозной регулятор, система управления, система охлаждения, защитные предохранители канала питания ПСН, система пожаротушения [4].

Самыми распространенными из выявленных отказов ТП на ЭС104, эксплуатируемых на Октябрьской железной дороге, по итогам 6 месяцев работы явились неисправность тягового контроллера или контроллера тормозного регулятора и потеря связи с тяговым контроллером. Для того чтобы проанализировать данные отказы, рассмотрим назначение и работу тягового контроллера как элемента системы управления электропоездом (далее — СУЭ).

СУЭ выполняет управление режимами «тяга» и «торможение» на ТЭД в соответствии с заданием тяговых или тормозных усилий контроллером машиниста. Далее происходят выдача команд составным частям ТП, сбор диагностической информации от аппаратуры ТП и синхронизация параллельной работы с другими ТП. В результате на валах ТЭД реализуется соответствующий момент силы. ТП и СУЭ взаимодействуют между собой через основной и резервный выходные каналы Ethernet [4].

Тяговый контроллер — это элемент СУЭ, обеспечивающий опрос, выдачу команд и уставок составным частям ТП, а также связь между другими элементами СУЭ [4]. Следовательно, выход из строя тягового контроллера приводит к нарушениям в алгоритмах работы СУЭ при задании контроллером машиниста режима тяги или торможения, что, в свою очередь, ведет к прекращению штатной работы ТП. В результате этого тяговый инвертор не осуществляет преобразование постоянного напряжения 3 кВ в переменное трехфазное напряжение с регулируемой амплитудой и частотой для питания ТЭД в режиме тяги, а также не реализует возврат

электрической энергии в режиме рекуперативного торможения [4].

Тормозной регулятор выполняет свою функцию с помощью тормозного резистора [10]. При реализации ЭДТ возможен переход ТП из режима рекуперативного торможения в режим реостатного торможения. При этом напряжение с тормозного регулятора поступает на тормозные резисторы, где электрическая энергия рассеивается в виде тепла [4, 10].

Также тормозной регулятор способен разряжать конденсаторы промежуточного контура, предназначенные для защиты тяговых инверторов от пульсаций напряжения в контактной сети. Кроме того, он ограничивает динамические перенапряжения промежуточного звена для защиты силовых модулей. В данных случаях тормозные резисторы используются в качестве активных фильтров [4].

При выходе из строя контроллера тормозного регулятора теряется возможность управления его перечисленными режимами работы.

Выявленные случаи потери связи с тяговым контроллером были обусловлены некачественным контактом между электрическим разъемом цепей управления X2 (рис. 5)

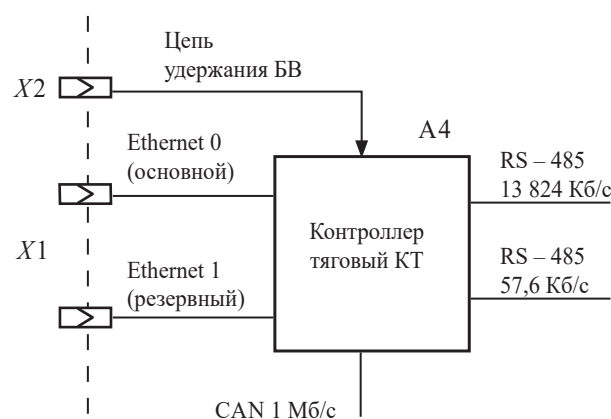


Рис. 5. Структурная схема внутренней кодовой линии связи тягового контроллера

и низковольтным кабелем, подводимым к ТП. В результате тяговый котроллер питание не получал, а ТП прекращал выполнять работу.

Выводы

Анализ рассмотренных видов отказов тягового электрооборудования на скоростных электропоездах постоянного тока серии ЭС104 показал, что подавляющее большинство неисправностей тягового привода обусловлено пробоем изоляции статорной обмотки асинхронного тягового электродвигателя, что приводило к выходам из строя тяговых двигателей. Также были зарегистрированы случаи отказов тяговых преобразователей, бóльшая часть которых явилась следствием неисправности тягового контроллера или контроллера тормозного регулятора, приведившей к невозможности питания тяговых двигателей и реализации рекуперативно-реостатного торможения.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости повышения качества производства тяговых двигателей и тяговых преобразователей, что является важнейшим критерием их надежности. Также необходимо совершенствовать технологию ремонта данных устройств, при этом комплектующие изделия необходимо приобретать у проверенных производителей электрических машин и микропроцессоров. От качества производства и ремонта рассмотренного оборудования зависит надежная эксплуатация электропоездов в условиях жестких требований к безопасности движения, а также возможность повышения уровня автоматизации управления поездами при проектировании новых моделей. По мере совершенствования производства электронных устройств произойдет повышение их надежности. Это, в свою очередь, поспособствует переходу от управления движением поездов локомотивными бригадами к беспилотному управлению.

Следовательно, развитие высокотехнологичного отечественного производства и ремонта силовых электрических машин и микропроцессорных устройств для электроподвижного состава — это не только гарант надежной, безопасной работы подвижного состава, но и необходимый критерий его технического прогресса.

Список источников

1. Скоростной пассажирский электропоезд «Финист» (ЭС104, ЭС105) // Уральские локомотивы. URL: <https://ulkm.ru/products/skorostnye-elektropoezda/es104-finish/#section-advantages> (дата обращения: 15.10.2025).
2. На дачу как на крыльях: в серийный выпуск поступят «Ласточки» российской сборки. URL: https://объясняем.рф/articles/useful/na_dachu_kak_na_krylyakh_v_seriynyy_vypusk_postupyat_lastochki_rossiyskoj_sborki/ (дата обращения: 15.10.2025).
3. Финист. URL: <https://www.rzd.ru/ru/9318/page/9000?id=75> (дата обращения: 15.10.2025).
4. Электропоезд пригородный экспресс типа ЭПЭ серии ЭС104. Руководство по эксплуатации. Часть 4. ЭС104.0.00.000.000 РЭЗ.
5. Кацман М. М. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. 16-е изд., стер. М.: Академия, 2017. 496 с.
6. Щукин О. С. Электрические машины. Трансформаторы. Асинхронные машины: курс лекций. Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2019. 109 с.
7. Электропоезд ЭС2Г: учебное пособие: в 2 ч. / А. В. Ширяев [и др.]; под ред. А. В. Ширяева. М.: ОАО «Российские железные дороги», 2019.
8. Двигатель асинхронный тяговый ДАТ-330У1. Руководство по эксплуатации. ДИЖЦ.526872.001РЭ-ЛУ.
9. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г. Руководство по эксплуатации. Часть 2. ЭС2Г.0.00.000.000 РЭ1.
10. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г исполнения «Стан-

дарт». Руководство по эксплуатации. Часть 4. ЭС2Г.0.00.000.000-01 РЭЗ.

Дата поступления: 19.01.2026

Решение о публикации: 06.02.2026

Контактная информация:

ИВАЩЕНКО Валерий Олегович — канд. техн. наук, доцент; vio1313@mail.ru

ШЕЛАГУРОВ Александр Владимирович — студент; sasha-shell2014@yandex.ru

Analysis of traction electrical equipment failures in ES104 “Finist” DC high-speed trains

V. O. Ivaschenko, A. V. Shelagurov

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

For citation: *Ivaschenko V. O., Shelagurov A. V.* Analysis of traction electrical equipment failures in ES104 “Finist” DC high-speed trains // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 92–100. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-92-100. (In Russian)

Abstract

Objective: in 2025, ES104-series high-speed electric trains equipped with asynchronous traction drives commenced regular service on routes operated by the Oktyabrskaya Railway. During this period, a multiple malfunctions of traction electrical equipment – primarily asynchronous traction motors and traction converters – were recorded. This paper analyses the types and underlying causes of asynchronous traction drive failures identified over a six-month monitoring period of ES104 electric train operation on the Oktyabrskaya Railway using maintenance and repair records. **Methods:** this study examines faults in the asynchronous traction-drive system of ES104 trains that precipitated failures of the asynchronous traction motors and traction converters. **Results:** analysis showed that asynchronous traction motor failures originate from insulation breakdowns in their stator windings, leading to reduced insulation resistance between the stator winding and motor housing, interphase short circuits within the winding, and open circuit (phase-break) faults of the stator winding. Failures of traction converters were primarily associated with malfunctions of the traction controller or the brake regulator controller. These observations highlight the imperative to improve the manufacturing quality of the electrical equipment in order to enhance its reliability. The study produced a set of recommendations for eliminating the identified defects. **Practical significance:** these findings are relevant for the advancement of manufacturing technologies for power-electrical systems in electric rolling stock, as they address the primary operational problem facing contemporary high-speed ES104 series trains — recurrent failures of asynchronous traction motors and traction converters.

Keywords: ES104 electric train, failure, traction electrical equipment, traction motor, stator winding, traction converter, electric train control system, traction controller, brake regulator

References

1. Skorostnoj passazhirskij elektropoezd “Finist” (ES104, ES105) // Ural’skie lokomotivy. URL: <https://ulkm.ru/products/skorostnye-elektropoezda/es104->

finist/#section-advantages (data obrashcheniya: 15.10.2025). (In Russian)

2. Na dachu kak na kryl’yakh: v serijnyj vypusk postupyat “Lastochki” rossijskoj sborki. URL: <https://>

ob"yasnyaem.rf/articles/useful/na_dachu_kak_na_krylyakh_v_seriynyy_vypusk_postupyat_lastochki_rossiyskoy_sborki/ (data obrashcheniya: 15.10.2025). (In Russian)

3. Finist. URL: <https://www.rzd.ru/ru/9318/page/9000?id=75> (data obrashcheniya: 15.10.2025). (In Russian)

4. Elektropoezd prigorodnyj ekspres tipa EPE serii ES104. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 4. ES104.0.00.000.000 REZ. (In Russian)

5. Katsman M. M. Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya stud. uchrezhdenij sred. prof. Obrazovaniya. 16-e izd., ster. M.: Akademiya, 2017. 496 s. (In Russian)

6. Shchukin O. S. Elektricheskie mashiny. Transformatory. Asinkhronnye mashiny: kurs leksij. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovskij gosudarstvennyj universitet, 2019. 109 s. (In Russian)

7. Elektropoezd ES2G: uchebnoe posobie: v 2 ch. / A. V. Shiryaev [i dr.]; pod red. A. V. Shiryaeva. M.: OAO "Rossijskie zheleznye dorogi", 2019. (In Russian)

8. Dvigatel' asinkhronnyj tyagovyj DAT-330U1. Rukovodstvo po ekspluatatsii. DIZhTs.526872.001RE-LU. (In Russian)

9. Elektropoezd s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 2. ES2G.0.00.000.000 RE1. (In Russian)

10. Elektropoezd s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G ispolneniya "Standart". Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 4. ES2G.0.00.000.000-01 RE3. (In Russian)

Received: 19.01.2026

Accepted: 06.02.2026

Author's information:

Valery O. IVASCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; vio1313@mail.ru

Aleksandr V. SHELAGUROV — Student; sasha-shell2014@yandex.ru

УДК 656.2

Выбор подвижного состава для обеспечения государственных перевозок: постановка задачи и методы решения

Н. Г. Кобозева, А. В. Новичихин

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

Для цитирования: Кобозева Н. Г., Новичихин А. В. Выбор подвижного состава для обеспечения государственных перевозок: постановка задачи и методы решения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 101–107. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-101-107

Аннотация

Цель: оптимизация порожних вагонопотоков для обеспечения необходимым подвижным составом требуемых объемов государственных перевозок путем решения задачи многокритериальной оптимизации. **Методы:** моделирование вариантов отбора вагонов для выполнения всех заявок на государственные перевозки. **Результаты:** разработан метод оптимизации порожних вагонопотоков, который позволяет сократить время и затраты на государственные перевозки, а также учитывает риски невыполнения нормативных сроков. **Практическая значимость:** состоит в использовании нового подхода при выборе вариантов подбора порожних вагонов для обеспечения государственных перевозок и возможностях его применения для организации других видов перевозок, а также в работе частных компаний операторов на рынке транспортных услуг.

Ключевые слова: железнодорожные перевозки, оптимальные варианты подсыла вагонов, государственные перевозки, эффективность, порожние вагонопотоки

Организация порожних вагонопотоков для обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок имеет стратегическое значение и повышает эффективность функционирования всей системы транспортного обеспечения страны.

Для решения задач по отбору вагонов для организации государственных перевозок необходимо разработать математическую модель и программное обеспечение, которое ускорит время принятия решений и повысит эффективность организации процесса [1–3]. Необходимо решить задачу многокритериальной оптимизации методом Парето на основе справедливого компромисса.

Критериями принятия оптимальных решений в задаче являются: время на подсыл

вагонов к местам погрузки, затраты на организацию доставки вагонов и полное обеспечение всех заявок на порожние вагоны. Подсыл вагонов может осуществляться к нескольким станциям концентрации грузопотоков. Грузопотоки должны быть в полном объеме обеспечены порожними вагонами необходимого типа [4, 5]. Выбор станций отправления порожних вагонов и станций назначения для их дальнейшей погрузки ограничен нормативным временем на подсыл вагонов. Заявка должна быть обеспечена в срок не более 3 суток, как прописано в регламенте по организации срочных перевозок на железнодорожном транспорте.

Для математического описания задачи принимаем:

Z — количество подаваемых заявок;

$X = (x_1, \dots, x_n)$ — вектор порожнего подвижного состава (ПС), где x_k — порожний состав по родам вагонов, принадлежащий k -му оператору;

$T = (t_1, \dots, t_n)$ — вектор времени доставки вагонов; \bar{T} — время доставки вагонов (нормативное) при организации срочных перевозок;

$C = (c_1, \dots, c_n)$ — вектор затрат на доставку порожних вагонов, где C_k — затраты государства на доставку порожних вагонов, в том числе изъятых у компаний-операторов;

$L = (l_1, \dots, l_n)$ — вектор удаленности вагонов k -го оператора от места погрузки;

R — определяемый расчетным путем радиус дислокации подвижного состава, в пределах которого необходимо осуществить подбор порожних вагонов с учетом рисков. Он рассчитывается на основе анализа оценки рисков невыполнения нормативных сроков подсыла вагонов при организации срочных перевозок [6–9]. Расчеты производятся на основе прогнозируемых данных и меняются в зависимости от принимаемых параметров.

Рассмотрим последовательно критерии математического моделирования. Затраты на полное обеспечение подвижным составом всего объема грузов по государственным заказам на железнодорожном транспорте обеспечиваются государственными активами на основе постановления Правительства РФ от 31 декабря 2016 г. № 1590 «Об оказании услуг по организации и осуществлению воинских и специальных железнодорожных перевозок» [10].

Сокращение затрат возможно путем снижения платы за подсыл вагонов.

Расчет платы за перевозку порожних вагонов к местам погрузки осуществляется на основании соответствующей нормативно-правовой документации на железнодорожном транспорте [10, 11].

Функция f_1 зависит от вектора X :

$$f_1(X) = \sum_{k=1}^n c_k x_k = C^t \cdot X, \quad (1)$$

где $C^t \cdot X$ — произведение матрицы-строки $C^t = (c_1, \dots, c_n)$ и матрицы-столбца $X = (x_1, \dots, x_n)$.

Определение сроков доставки порожних вагонов производится в соответствии с Правилами перевозок грузов железнодорожным транспортом [12]. В свою очередь, сроки оборота вагонов определяются Порядком разработки и определения технологических сроков оборота вагонов [13] и технологическими нормами (i -вагон, j -станция). Таким образом, общее время складывается из суммы этих двух компонентов.

Оборот вагона по станции состоит из:

$$t_{об}^{ij} = t_{нд}^{ij} + t_{нод}^{ij} + t_{с(n)}^{ij} + t_{уб}^{ij} + \alpha(t_p^{ij} + t_\phi^{ij}) + \beta t_{нрс}^{ij}, \quad (2)$$

где α и β принимают значение 1 для вагонов с одной и двумя грузовыми операциями, а 0 — для маршрутных отправок и других случаев.

В случае поступления вагонов в составе маршрута время на станции отправления составит:

$$t_{ст.о}^{ij} = t_{нак}^{ij} + t_{зф}^{ij} + t_o^{ij}, \quad (3)$$

где t — это время на станции отправления, затрачиваемое на приемосдаточные операции ($t_{нд}^{ij}$), на подачу-уборку вагонов ($t_{нод}^{ij}$), на расформирование (t_p^{ij}) и формирование (t_ϕ^{ij}), на выгрузку (погрузку) ($t_{с(n)}^{ij}$), на уборку вагонов ($t_{уб}^{ij}$), на перестановку ($t_{нрс}^{ij}$), накопление ($t_{нак}^{ij}$), завершение формирования состава ($t_{зф}^{ij}$) и отправление (t_o^{ij}).

В случае поступления вагонов в составе группы на станцию сбора:

$$T_{онеп}^{ij} = \alpha t_{ac}^{cbij} + \beta(t_{омб}^{ij} + t_{нак}^{ij} + t_\phi^{ij} + t_{оно}^{ij}) + \mu(t_{об1}^{ij} + t_{неп}^{ij}) + \gamma_{об2}^{ij} + t_{онн}^{ij}, \quad (4)$$

где α принимает значение 1 при сборе вагонов с промежуточных станций участка и 0 —

для других случаев; β принимает значение 1 при сборе вагонов с участков станции с переработкой и без переработки в пути следования и 0 — для других случаев; $\mu = 1$, если сбор вагонов осуществляется с участков станций с переработкой и 0 — для других случаев; $\gamma = 0$, если это доставка групп вагонов со станций примыкающих участков; $\gamma = 1$ — для других случаев.

В эту сумму входят операции по отбору и накоплению вагонов, формированию составов, обработке их по отправлению, движение до станций переработки и погрузки, переработка на сортировочной станции, обработка по прибытии, сбор вагонов со станций участков.

Время подсыла порожних вагонов к станциям погрузки складывается из времени в пути следования и дополнительного времени на сбор вагонов и формирование составов на станции отправления:

$$t_i = \max \left(\frac{l_k^i}{\mathbf{v}_k} + \tau_k^i \right). \quad (5)$$

Дополнительным временем, как оказывающим незначительное влияние на конечный результат при моделировании, возможно пренебречь. Временем обеспечения подвижным составом будет считаться время подсыла последнего вагона или группы вагонов для обеспечения последующей погрузки (рис. 1).

$$t_i = \max \left(\frac{l_k^i}{\mathbf{v}_k} \right). \quad (6)$$

Из всех возможных вариантов подсыла порожних вагонов до полного обеспечения всех заявок на государственные перевозки при отборе в пределах оптимального радиуса дислокации (R) должен быть выбран вариант с полученным минимальным значением:

$$f_2(T) = t_i \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$l_k^i = \mathbf{v}_k t_k^i \leq R, \quad 0 \leq \frac{l_k^i}{\mathbf{v}_k} \leq \frac{R}{\mathbf{v}_k}, k = 1, \dots, n,$$

где l_i — тарифное расстояние подсыла вагонов, определяемое по Тарифному руководству № 4.

Все заявки на государственные перевозки должны быть выполнены, то есть весь объем груза должен быть обеспечен порожними вагонами необходимого типа на t -е сутки. В первую очередь отбираются порожние вагоны необходимого типа (x_{0i}). В случае если их количество недостаточно для обеспечения всех заявок, то отбираются вагоны из резервов компаний-операторов (x_{ri}). Если и в этом случае заявки не закрыты, отбираются вагоны из-под погрузки или груженные (x_{ci}), а также вагоны других типов, подходящие по своим техническим характеристикам для погрузки груза (v_{0i}).

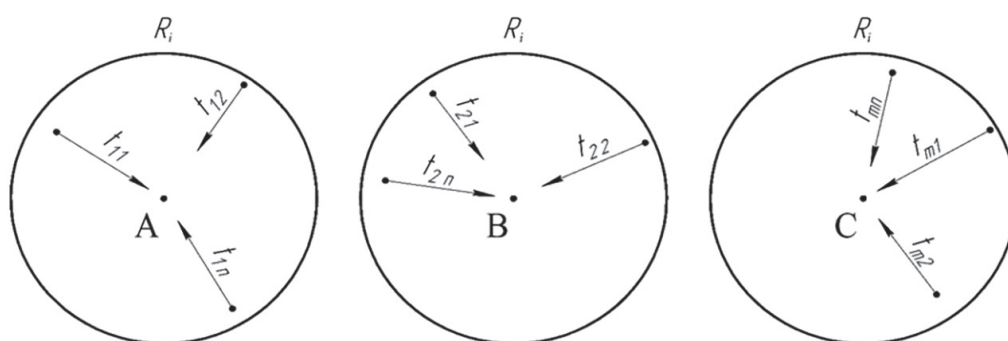


Рис. 1. Варианты подсыла вагонов к станциям погрузки с учетом оптимального радиуса R

Таким образом,

$$x_i = x_{0i} + x_{ri} \cdot \alpha_i + y_{i0} \cdot \beta_i + x_{ci} \cdot \gamma_i \quad (8)$$

где $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \in \{0,1\}$; $(1,0,0)$, $(1,1,0)$, $(1,1,1)$, $(1,0,1)$, $(0,1,0)$, $(0,1,1)$, $(0,0,1)$.

Тогда

$$f_3 = \sum_i x_i = \sum (x_{0i} + x_{ri} \cdot \alpha_i + y_{i0} \cdot \beta_i + x_{ci} \cdot \gamma_i) \rightarrow \max. \quad (9)$$

Введем ограничения:

$$\sum_i x_i = \sum_i (x_{0i} + x_{ri} \cdot \alpha_i + y_{i0} \cdot \beta_i + x_{ci} \cdot \gamma_i) = z \quad (10) \quad \text{либо}$$

$$t_i = \max \left(\frac{l_k^i}{v_k} + \tau_k^i \right) \leq \bar{T} \quad (11)$$

$$l_k^i \leq R. \quad (12)$$

Очевидно, что $x_i \geq 0$:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix} \quad C = C_B(T) = \begin{pmatrix} c_1(t_1) \\ \vdots \\ c_n(t_n) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Проведены модельные эксперименты, в которых необходимо было выбрать порожние вагоны компаний-операторов, находящиеся в данный момент времени на станциях, расположенных на выбранном полигоне железнодорожной сети, для подсыла их на станции погрузки по государственным заказам. Ниже приведен пример исходных данных (табл. 1), где КПП, КРГ, ФГК (АО «Федеральная грузовая компания»), ПГК (АО «Первая Грузовая Компания») и т. д. — обозначение видов подвижного состава в порожнем, груженом состоянии и в резерве, принадлежащем государственным и частным компаниям-операторам.

Выбор оптимальных вариантов производится по следующим критериям оптимальности:

- целевая функция 1 по X (затраты на доставку порожнего подвижного состава)

$$f_1(X) = \sum_{k=1}^n (C_k x_k) \rightarrow \min; \quad (14)$$

- целевая функция 2 по T (срок доставки до мест погрузки)

$$f_2(T) = t_i \rightarrow \min; \quad (15)$$

- целевая функция 3 по X (выполнение всех заявок на порожние вагоны)

$$f_3(X) = \sum_{s=1}^n x_s \rightarrow \max \quad (16)$$

$$f_4 = -f_3(X) \rightarrow \min. \quad (17)$$

При этом:

$$Y = (X, T) \in R^{n+n} \Leftrightarrow Y = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ t_1 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \\ y_{n+1} \\ \vdots \\ y_{n+n} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Таким образом:

$$F(Y) = (f_1(X), f_2(T), f_4(X)) \rightarrow \min, \quad (19)$$

$$G(y = f(x)) = \{(x, y) \mid x \in x, y \in y\}, \quad (20)$$

$y = f(x)$ в плоскости $хоу$.

Векторное значение будет выглядеть следующим образом:

$$D: \begin{cases} X > 0 \\ \max_i y_i \leq T_0 \\ \sum_{k=1}^n y_k = Z \\ l_k^i \leq R, i, k = 1 \dots n \end{cases} \quad (21)$$

Так как в примере моделирования задано условие полного обеспечения всех заявок, то для учета рисков в качестве третьего критерия выступает критерий удаленности от мест погрузки.

Результатом моделирования являются таблицы сравнения таких показателей, как время

ТАБЛИЦА 1. Набор из 10 операторов для отбора вагонов

Название/номер оператора	Время подсыла (Т)	Затраты (С)	Расстояние от места дислокации ПС до места подсыла (L)	КПГ	КРГ	КТГ	КПЧ	КРЧ	КГЧ	ППГ	ПРГ	ПГГ	ППЧ	ПРЧ	ПГЧ	УППГ	УПРГ	УПГГ	УППЧ	УПРЧ	УПГЧ	ФГ	КГ	ФЧ	КЧ
1	8	94961	107	0	0	0	27	9	0	0	0	0	36	14	1	0	0	0	20	14	2	0	0	14	26
2	14	192115	182	0	0	0	36	27	3	0	0	0	29	15	2	0	0	0	43	16	4	0	0	5	25
3	8	88869	81	27	32	2	0	0	0	25	18	1	0	0	0	31	37	3	0	0	0	19	40	0	0
4	8	99577	183	0	0	0	25	46	2	0	0	0	47	6	4	0	0	2	32	48	3	0	0	17	17
5	6	69549	64	26	48	1	0	0	0	6	20	1	0	0	0	2	34	0	0	0	0	23	32	0	0
6	8	117310	186	0	0	0	34	38	3	0	0	0	11	32	0	0	0	0	20	15	1	0	0	39	12
7	12	164632	153	0	0	0	15	20	1	0	0	0	8	23	0	0	0	0	43	1	6	0	0	43	12
8	10	127332	127	0	0	0	43	39	0	0	0	0	3	42	0	0	0	0	41	11	1	0	0	22	19
9	7	68858	68	0	0	0	30	21	3	0	0	0	24	29	1	0	0	0	48	15	2	0	0	33	5
10	8	185994	107	0	0	0	0	32	0	0	0	0	26	35	1	0	0	0	46	5	5	0	0	47	29

подсыла вагонов, затраты на организацию и удаленность от мест погрузки. Путем их сравнения методом Парето получаем таблицу с выбранными операторами для подсыла вагонов. Пример с результатами моделирования представлен в табл. 2.

На основе оценки нормализованных результатов моделирования производится выбор оптимальных вариантов методом Парето-оптимизации. На основании приведенного

примера выбраны варианты подбора вагонов у операторов 3, 5 и 9.

Таким образом, результатом выбора является оптимальный набор операторов на полигоне дислокации из числа частных и государственных компаний, вагоны которых должны быть использованы для обеспечения заявок на государственные перевозки. Предлагаемая модель обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок позволит осуществить выбор

ТАБЛИЦА 2. Показатели отбора операторов

Оператор	Время подсыла вагонов, Т (f_1)	Затраты, С (f_2)	Удаленность, L (f_3)
Оператор 1	8	94961	107
Оператор 2	14	192115	182
Оператор 3	8	88869	81
Оператор 4	8	99577	183
Оператор 5	6	69549	64
Оператор 6	8	117310	186
Оператор 7	12	164632	153
Оператор 8	10	127332	127
Оператор 9	7	68858	68
Оператор 10	8	185994	107

подвижного состава на основе комплексирования параметров, что даст возможность принимать оптимальные решения, минимизировать не только время, но и затраты на перевозки.

Список источников

1. Ногин В.Д. Множество и принцип Парето. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. 100 с.
2. Леонова Н.Л. Задачи линейного программирования и методы их решения. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. 75 с.
3. Минькова Р.М., Чуксина Н.В. Векторный анализ в примерах и задачах. Екатеринбург: УРФУ, 2013. 65 с.
4. Абрамов А.А. Математическое моделирование транспортных процессов. М.: РГОТУПС, 2002. 128 с.
5. Партыкина Т.Л., Попов И.И. Математические методы. М.: Форум, Инфа-М, 2005. 464 с.
6. Экономико-математические методы и прикладные модели / В.В. Федосеев и др. М.: Юнити, 2002. 392 с.
7. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 496 с.
8. Ахмадиев Ф.Г., Гильфанов Р.М. Математическое моделирование и методы оптимизации. Казань: КГАСУ, 2017. 178 с.
9. Кобозева Н.Г., Новичихин А.В. Разработка метода оценки рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций // Из-

вестия Петербургского университета путей сообщения. 2023. № 2. С. 424–432.

10. Об оказании услуг по организации и осуществлению воинских и специальных железнодорожных перевозок: постановление Правительства РФ от 31.12.2016 № 1590 (ред. от 18.02.2023). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_210605 (дата обращения: 10.06.23).
11. Правила перевозок грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом: приказ Министерства транспорта РФ от 27.07.2020 № 256.
12. Об утверждении порядка проведения аукциона по привлечению железнодорожного подвижного состава и контейнеров: приказ ФАС России от 19.10.2017 № 1384/17 (ред. от 02.07.2018).
13. Об утверждении Порядка разработки и определения технологических сроков оборота вагонов и технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов: приказ МПС РФ от 29.09.2003 № 67.

Дата поступления: 20.01.2026

Решение о публикации: 23.02.2026

Контактная информация:

КОБОЗЕВА Нона Гивиевна — ст. преподаватель кафедры «Логистика и коммерческая работа»; nonakobozeva@yandex.ru
 НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, зав. кафедрой «Логистика и коммерческая работа»; novitchihin@bk.ru

The choice of the rolling stock for public transportation: problem statement and solution approaches

N.G. Kobozeva, A.V. Novichikhin

St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg 190031, Russia

For citation: *Kobozeva N.G., Novichikhin A.V. The choice of the rolling stock for public transportation: problem statement and solution approaches // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 101–107. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-101-107. (In Russian)*

Abstract

Objective: the study addresses the optimization of empty-wagon flows to ensure the provision of required public-transport volumes with an adequate fleet by solving a multi-criteria optimization issue. **Methods:** the approach is based on modelling alternative schemes for railcar allocation aimed at satisfying all public transportation requests. **Results:** a method for optimizing empty railcar movements has been developed, which reduces the time and cost of public transportation while explicitly accounting for the risk of failing to meet regulatory deadlines. **Practical significance:** the proposed approach offers a novel framework for selecting empty-wagon allocation options to support public transportation. It has potential applications in organizing other transport modalities, and can be employed by private operators competing in the transport services market.

Keywords: railway transportation, optimal wagon-loading options, public transportation, efficiency, empty-wagon flows

References

1. Nogin V.D. Mnozhestvo i printsip Pareto. SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedenij, 2020. 100 s. (In Russian)
2. Leonova N.L. Zadachi linejnogo programirovaniya i metody ikh resheniya. SPb.: VShTE SPbGUPTD, 2017. 75 s. (In Russian)
3. Min'kova R.M., Chuksina N.V. Vektornyj analiz v primerakh i zadachakh. Ekaterinburg: URFU, 2013. 65 s. (In Russian)
4. Abramov A.A. Matematicheskoe modelirovanie transportnykh protsessov. M.: RGOTUPS, 2002. 128 s. (In Russian)
5. Partykina T.L., Popov I.I. Matematicheskie metody. M.: Forum, Infa-M, 2005. 464 s. (In Russian)
6. Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli / V.V. Fedoseev i dr. M.: Yuniti, 2002. 392 s. (In Russian)
7. Korshunov Yu.M. Matematicheskie osnovy kibernetiki. M.: Energoatomizdat, 1987. 496 s. (In Russian)
8. Akhmadiev F.G., Gil'fanov R.M. Matematicheskoe modelirovanie i metody optimizatsii. Kazan': KGASU, 2017. 178 s. (In Russian)
9. Kobozeva N. G., Novichikhin A.V. Razrabotka metoda otsenki riskov obespecheniya zheleznodorozhnym podvizhnym sostavom gosudarstvennykh perezovok v usloviyakh chrezvychajnykh situatsij // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. No. 2. S. 424–432. (In Russian)
10. Ob okazanii uslug po organizatsii i osushchestvleniyu voinskikh i spetsial'nykh zheleznodorozhnykh perezovok: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 31.12.2016 No. 1590 (red. ot 18.02.2023). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_210605 (data obrashcheniya: 10.06.23). (In Russian)
11. Pravila perezovok gruzov, porozhnykh gruzovykh vagonov zheleznodorozhnym transportom: prikaz Ministerstva transporta RF ot 27.07.2020 No. 256. (In Russian)
12. Ob utverzhdenii poryadka provedeniya auktsiona po privlecheniyu zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i kontejnerov: prikaz FAS Rossii ot 19.10.2017 No. 1384/17 (red. ot 02.07.2018). (In Russian)
13. Ob utverzhdenii Poryadka razrabotki i opredeleniya tekhnologicheskikh srokov oborota vagonov i tekhnologicheskikh norm pogruzki gruzov v vagony i vygruzki gruzov iz vagonov: prikaz MPS RF ot 29.09.2003 No. 67. (In Russian)

Received: 20.01.2026

Accepted: 23.02.2026

Author's information:

Nona G. KOBOZEVA — Senior Lecturer of the Department “Logistics and Commercial work”; nona-kobozeva@yandex.ru
Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Head of the Department “Logistics and Commercial Work”; novichihin@bk.ru

УДК 656.073.7

Проблема повышения скорости грузовых отправок

Б. М. Лapidус¹, А. Т. Осьминин^{1,2}, И. И. Осьминина², Т. А. Малахова²

¹АО «ВНИИЖТ» (акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»), Россия, 129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, 10

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

Для цитирования: *Лapidус Б. М., Осьминин А. Т., Осьминина И. И., Малахова Т. А.* Проблема повышения скорости грузовых отправок // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 108–116. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-108-116

Аннотация

Цель: рассмотрение вопроса ускорения грузовых транспортных потоков на железнодорожном транспорте. Для достижения поставленной цели выделены ключевые причины, негативно влияющие на скорость доставки. **Методы:** сбор, сравнение и систематизация данных по скорости движения грузовых поездов. **Результаты:** сделан вывод о необходимости дифференцированного подхода к выработке мер по ускорению транспортных потоков и комплексного подхода к решению задачи по повагонным отправкам. Предложена классификация факторов, влияющих на скорость доставки грузовых отправок, обоснованы ключевые направления развития мер по повышению скорости движения. Подчеркнуто, что на ускорение потоков непосредственно влияют организация, технология, культура данных, масштабирование цифровых технологий и квалификация персонала. **Практическая значимость:** показана необходимость пересмотра существующих подходов к разработке графиков движения и создания адаптивных цифровых моделей, опирающихся на прогноз. Комплексный научный подход к оптимизации логистики и управлению перевозками и внедрение интеллектуальных ИИ-решений в перевозках позволят существенно повысить скорость железнодорожной доставки грузов.

Ключевые слова: скорость доставки, ключевые причины, объективные факторы, изменяемые факторы, цифровизация, электронные сервисы

Одним из ключевых показателей эффективности железнодорожного транспорта является скорость, которая трансформируется в важнейший критерий — время доставки грузов и пассажиров. Она отражает не только технологическое совершенство перевозочного процесса, но и степень интеграции транспорта в экономику страны, способность удовлетворения запросов общества и внутриотраслевой конкурентоспособности железнодорожного транспорта [1, 2].

В условиях, когда бизнес требует ритмичной, управляемой и адаптивной логистики,

именно ускорение транспортных потоков становится центральной задачей развития железнодорожной системы. Рычаги влияния на скорость транспортных потоков понятны — это своевременное и опережающее развитие инфраструктуры и техники, стремление к технологическому совершенству, квалифицированные кадры и на современном этапе — глубокая цифровая трансформация, включая применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и математического моделирования [3, 4].

Ключевые причины, негативно влияющие на скорость доставки

Средняя скорость доставки грузов железнодорожным транспортом (в 2025 году — 380 км/сут., в 2024 г. — 364 км/сут.) не велика по совокупности и по большому счету не является привлекательной для клиентов. Однако маршрутная отправка по скорости достигает 800–860 км/сут. (при нормативе 550 км/сут.). При этом узким технологическим и рыночным элементом является скорость повагонных отправок (220–230 км/сут.). Данный показатель требует не комментариев, а формулирования необходимости его повышения как большой научной прикладной задачи.

Как видно из рис. 1, скорость доставки грузов на сети дорог имеет сильную дифференциацию и существенно зависит от вида отправок. Контейнерные поезда по выделенным ниткам графика (Транссиб за 7 суток) перемещаются со скоростью свыше 1000 км/сут. (40 км/ч). Это указывает на необходимость дифференцированного подхода к выработке мер по ускорению транспортных потоков и комплексного

подхода к решению задачи по повагонным отправлениям.

Ключевые причины, негативно влияющие на скорость доставки, можно условно разделить на две группы: объективные и изменяемые (управляемые). Предложенная классификация представлена на рис. 2.

Объективные факторы

Протяженность маршрутов и масштабы страны

Россия обладает огромной территорией, поэтому грузы по железной дороге перевозятся на очень большие расстояния (средняя дальность — около 1900–2000 км. Значительная протяженность маршрутов неизбежно увеличивает время в пути, существенная часть перевозок проходит через удаленные регионы с ограниченной инфраструктурой, что затрудняет ускорение доставки. Но в этих условиях сеть работает много лет, значит, в целом этот фактор компенсирован.

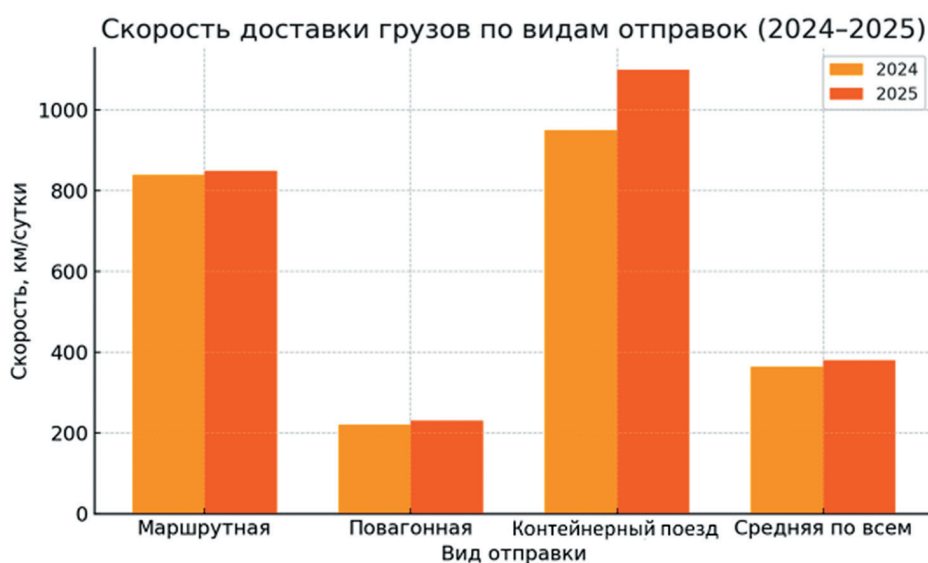


Рис. 1. Скорость доставки по видам отправок

Ключевые причины, негативно влияющие на скорость доставки

Объективные факторы

Протяженность маршрутов и масштабы страны
Суровые климатические условия
Особенности и ограничения инфраструктуры
Организация смешанного движения грузовых и пассажирских поездов на одних и тех же линиях
Проведение ремонтно-строительных работ на инфраструктуре
Несовместимость колеи и международные стыки

Изменяемые факторы

Фрагментированность рынка, недостаточная координация перевозок и излишний парк подвижного состава
Перегруженность узлов и погранпереходов
Неэффективное планирование графиков и приоритетов движения
Износ и недостаточность тягового подвижного состава и путевого хозяйства
Длительные операции и административные задержки
Переход на АСУ нового поколения: издержки автоматизации и качество систем

Рис. 2. Классификация факторов, влияющих на скорость доставки грузовых отправок

Суровые климатические условия

Климат России осложняет стабильное быстрое движение поездов. Зимой сильные морозы, снегопады и метели вынуждают снижать скорость движения и приводят к закрытию отдельных путей станций и перегонов для очистки. Низкие температуры вызывают смерзание угля и других навалочных грузов, из-за чего вагоны задерживаются под выгрузкой. Летом жара может приводить к нагреву и деформации рельсов, также требуя ограничений скорости. Этот фактор также частично компенсируется зимой — меньшими объемами пассажирских перевозок.

Особенности и ограничения инфраструктуры

Исторически многие участки сети не рассчитывались на большой грузооборот. Значительная часть путей — однопутные, особенно на периферийных направлениях. Пропускная способность ряда участков и узлов ограничена: при пиковых нагрузках большое число со-

ставов задерживается на подходах к станциям. Многие магистральные коридоры, в первую очередь Транссиб и БАМ, работают на пределе возможностей, и отсутствие параллельных маршрутов и резервов пропускной способности приводит к «узким местам», где снижается общая маршрутная скорость. Также технические ограничения путевого хозяйства (уклоны, радиусы кривых, состояние путей) налагают ограничения на скорость движения.

Организация смешанного движения грузовых и пассажирских поездов на одних и тех же линиях

При совместном движении пассажирских и грузовых поездов приоритет отдается первым — грузовые поезда ставят под обгон на боковые пути, чтобы пропустить пассажирские поезда. На двухпутных линиях снижение скорости может достигать от 55 до 30 км/ч по мере роста доли пассажирских поездов, на однопутных скорость падает быстрее — от 45 до 20 км/ч из-за невозможности одновременного

пропуска поездов в обоих направлениях с соответствующей остановкой поездов под обгон и скрещение. Съём грузового движения — объективный фактор снижения скоростей движения поездов, который вызывает необходимость организации тяжеловесного и длинносоставного движения, подготовка которого требует дополнительных задержек, в том числе из-за недостаточно развитой инфраструктуры линий и станций.

Проведение ремонтно-строительных работ на инфраструктуре

Ежегодно выполняются большие объемы ремонтов, модернизация линий (усиление Восточного полигона — БАМа и Транссиба, реконструкция подходов к портам, обновление путей на других магистралях). Эти работы требуют плановых перерывов в движении на участках. Во время «окон» движение поездов либо прекращается, либо ограничивается по одному пути с поочередным пропуском. Следствием являются снижение участковой скорости и рост времени доставки грузов.

Сложности работы на международных стыках

Разница ширины колеи, которая требует перестановки вагонных тележек либо перегруза контейнеров, а иногда и грузов, добавляет несколько часов, а то и сутки к сроку доставки. Помимо этого, таможенный и пограничный контроль даже при слаженной работе служб, физическая необходимость смены колеи и перевалки грузов неизбежно снижают среднюю скорость доставки на международных маршрутах, объективно удлиняя время в пути.

При всем этом все эти факторы должны нивелироваться в долгосрочном периоде, в основном за счет инвестиционной политики. Вместе с тем серьезнейшее влияние на скорость оказы-

вают организационно-управленческие, технологические, экономические, кадровые вопросы.

Изменяемые (управляемые) факторы

Фрагментированность рынка, недостаточная координация перевозок и излишний парк подвижного состава

Это самый существенный фактор, поскольку системы управления парками ОАО «РЖД» не успевают адаптироваться под изменившиеся условия. Рост избыточного вагонного парка существенно тормозит движение. При этом позитивный процесс закупки операторами новых вагонов не поддерживается списанием старого, выработавшегося и морально устаревшего ресурса. Избыток подвижного состава требует дополнительных локомотивных бригад, загружает инфраструктуру, провоцирует сбои и существенно замедляет скорость грузопотока. Этот фактор можно изменить за счет лучшей координации между участниками перевозочного процесса и внедрения централизованных цифровых систем управления перевозочным процессом, реализующих ИИ-решения [5]. Это хорошо видно на рис. 3 при анализе показателей участковой скорости и оборота вагона.

РЖД проводят сложную, но правильную стратегию на выравнивание баланса числа вагонов и грузовой базы. За последний период выведено в отстой значительное число вагонов, не участвующих в перевозках. Эта мера привела к увеличению участковой скорости.

Как видно из поэлементного анализа структуры оборота вагона, показанного на рис. 4, именно на начально-конечных станциях отправок (почти половину времени оборота) и скапливается подвижной состав, не востребованный в перевозках, в ожидании отправки на пути отстоя.

На увеличение простоя также оказывают влияние и остальные факторы.

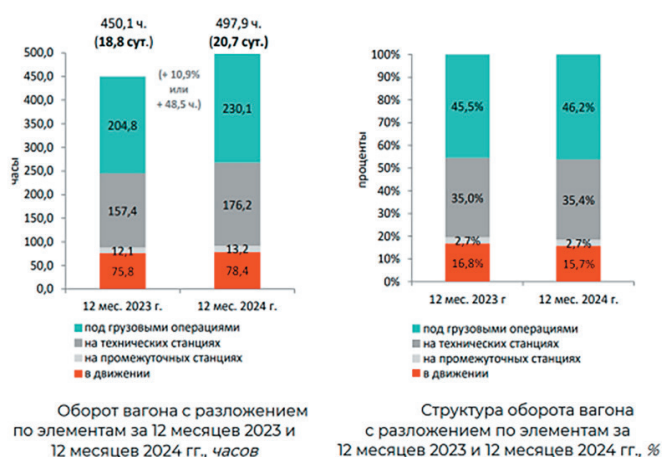


Рис. 3. Оборот грузового вагона в 2023–2024 годах

Длительные операции и административные задержки

Время доставки груза увеличивается из-за неэффективности отдельных операций в логистической цепочке. Отсутствие слаженности между грузоотправителем и перевозчиком (неготовность груза к отправке, задержка с подачей/уборкой вагонов) удлинит оборачиваемость вагонов. Неправильно оформленные таможенные или экспедиторские бумаги могут вызвать простои до прояснения ситуации [6]. Как правило, такие проблемы относятся имен-

но к повагонным отправкам и дополняют условия снижения скорости доставки. Устранение этих факторов — ускорение документооборота и оптимизация грузовых операций — способно уменьшить непроизводительные простои вагонов и повысить итоговую скорость доставки.

Перегруженность узлов и погранпереходов

Многие задержки возникают из-за неоптимальной организации работы на ключевых узловых станциях, в портах и на погранпереходах. При наплыве грузов отдельные узлы перегружаются, составы могут простаивать по несколько дней в ожидании обработки. Улучшение организации в узлах (ускорение обработки поездов, увеличение штата персонала, расширение мощностей терминалов) и межведомственная координация на границах способны сократить эти простои.

Однако относительно портов эта ситуация изменилась, и сейчас портовики и моряки в основном не сдерживают разгрузку. Анализ показывает, что значительное время вагоны находятся на технических станциях (35% оборота), в этом элементе видится основной резерв повышения скорости повагонных отправок. Сегодня идет цифровизация самых



Рис. 4. Сравнительный анализ структуры оборота вагона

чувствительных элементов перевозочного процесса — сортировочных станций.

Неэффективное планирование графиков и приоритетов движения

Несогласованность между подразделениями РЖД приводит к тому, что намеченные планы отправки расходятся с фактическим движением поездов, вынуждая составы ждать своей нитки графика. Это можно изменить улучшением планирования: введением твердых ниток графика для грузовых поездов (за доплату такая услуга уже практикуется и значительно ускоряет доставку), развитием ИИ-технологий диспетчерского управления, а также кардинальным изменением системы технического нормирования, предполагающей учет логистики операторов.

Износ и недостаточность тягового подвижного состава и путевого хозяйства

Технологические причины, зависящие от инвестиций и управления, тоже влияют на скорость. В парке локомотивов доля изношенной техники традиционно высока (еще в 2011 году почти 75 % локомотивов были выработавшими ресурс), что означает более частые поломки, ремонты и невысокие разгонные характеристики. Недостаток современных локомотивов и локомотивных бригад приводит к тому, что грузовые составы простаивают на станциях в ожидании подачи локомотивов, теряя скорость доставки. На ряде перегонов установлены пониженные скоростные лимиты из-за состояния инфраструктуры. Эти факторы являются изменяемыми: обновление парка локомотивов, модернизация путей и внедрение новых систем управления движением способны постепенно повысить участковую и техническую скорость поездов, а значит, сократить время доставки грузов.

Переход на АСУ нового поколения: издержки автоматизации и качество систем

В последние годы ОАО «РЖД» активно внедряет автоматизированные системы управления (АСУ) нового поколения в рамках цифровой трансформации и импортозамещения ИТ-инфраструктуры. Речь идет о целом комплексе новых программно-аппаратных решений, которые приходят на смену прежним информационным системам. Их внедрение призвано повысить эффективность и прозрачность перевозочного процесса, однако сопровождается определенными издержками автоматизации в виде сложностей переходного периода, необходимости обучения персонала и временного снижения качества работы из-за неотлаженности новых решений.

Переход на АСУ нового поколения и внедрение новых АС (примером может служить ДМ ЗИ) сопровождается рядом вызовов. Во-первых, технологические риски: новые системы неизбежно поначалу содержат ошибки, возможны сбои в их работе. Во-вторых, интеграционные проблемы: нужно связать между собой множество систем (перечисленные АСУ должны обмениваться данными). Если интеграция недостаточно отлажена, возникают расхождения в данных между системами, что временно ухудшает качество информационного обеспечения. В-третьих, человеческий фактор и обучение: персоналу всех уровней — от станционных работников до главных диспетчеров — приходится учиться работать в новых программах. Пока навыки не закрепились, возможны ошибки ввода данных, неверная интерпретация интерфейса, что тоже влияет на качество управления перевозками.

Представляется необходимым кардинальное изменение подходов для перехода на адаптивный план формирования. За счет

этого возможно существенно сократить время накопления вагонов на сортировочных станциях.

На сегодняшний день среднесуточная скорость контейнерного транзитного поезда в рамках проекта «Транссиб за 7 суток» превышает 1000 км/сут. и даже доходит до 1200 км/сут., то есть технически железные дороги России обладают потенциалом для ускоренной доставки. Но для его раскрытия необходим системный подход. Подобный подход необходим для решения задачи увеличения скорости повагонных и групповых отправок.

Проблема отставленных от движения поездов, растущая доля заявок, не обеспеченных реальной погрузкой, загруженность технических станций, вынужденные стоянки на промежуточных станциях — все это требует пересмотра существующих подходов к разработке графиков движения и создания адаптивных цифровых моделей, опирающихся на прогноз [7, 8].

Надо еще раз подчеркнуть, что на ускорение потоков непосредственно влияют организация, технология, культура данных, масштабирование цифровых технологий и, конечно, квалификация персонала. Ключевые направ-

ления развития мер по повышению скорости движения представлены на рис. 5.

Выводы

Комплексный научный подход к оптимизации логистики и управлению перевозками и внедрение интеллектуальных ИИ-решений в перевозках позволят существенно повысить скорость железнодорожной доставки грузов.

Законодательная и исполнительная власти четко обозначили необходимость перехода к интеллектуальной логистике, где ИИ, цифровые двойники и аналитика в реальном времени станут не просто экспериментами, а нормой работы.

В этом контексте особую роль играют такие «продвинутое» автоматизированные системы ОАО «РЖД», как ЕМД ПП, ЭТРАН НП, ДМ ЗИ, ПТК «Эльбрус», ВГДП ИСУЖТ и др. Электронизация документооборота, сопровождающаяся внедрением сквозных цифровых технологий, уже сегодня дает осязаемый эффект: автоматизация согласования заявок, цифровой контроль перемещения порожнего парка и сокращение ручных операций создают реальную основу для роста скорости доставки.

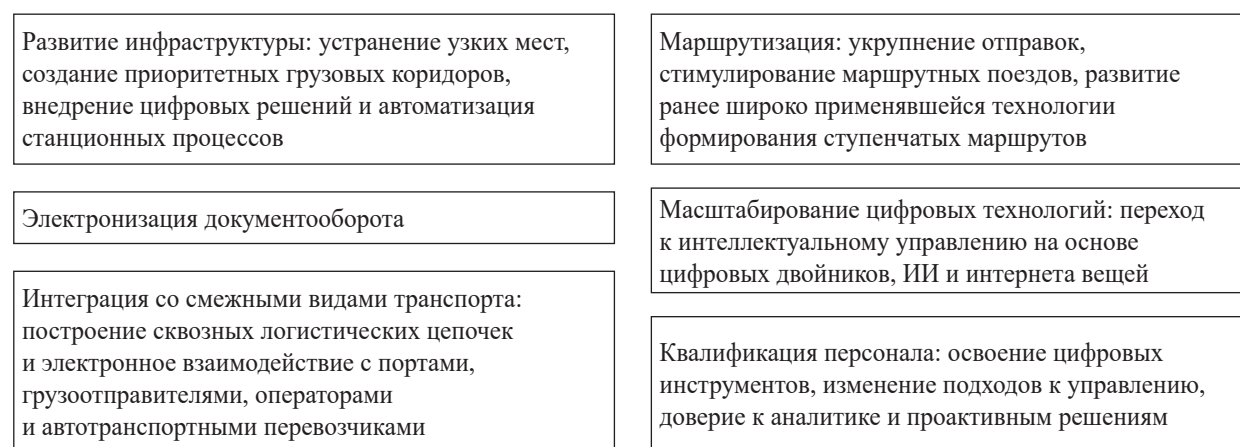


Рис. 5. Ключевые направления развития мер по повышению скорости движения

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г.: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р.

2. Лapidус Б.М. Задачи опережающего развития российских железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2023. № 2. С. 4–14. EDN HYNHML.

3. Чаркин Е. И. О реализации стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2020. № 2. С. 66–70. EDN VFXUOZ.

4. О перспективах разработки и применения технологии искусственного интеллекта при реализации транспортно-логистических задач в сфере грузовых перевозок / Б. М. Лapidус [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2025. № 5. С. 4–12. EDN HJDXVF.

5. Лapidус Б.М. Создание интеллектуальной интегрированной транспортной системы — прорывное инновационное решение // Железнодорожный транспорт. 2020. № 12. С. 26–33. EDN ZHSCIW.

6. Суродин Ю. Н. О научно-практических задачах ОАО «РЖД» в сфере электронного документооборота при перевозках грузов в международном сообщении // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2020. № 1–2. С. 27–34. EDN GMFEGF.

7. Лapidус Б.М. Осьминин А.Т., Ададулов С.Е. Цифровая трансформация перевозочного процесса

с учетом развития Динамической модели загрузки инфраструктуры ОАО «РЖД» // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2020. № 3–4. С. 1–21. EDN GKAEUA.

8. Виноградов С.А., Анфиногенов А.Ю., Кирякин В.Ю. Использование технологии больших данных при разработке вариантных графиков движения поездов и предиктивной аналитике загрузки инфраструктуры // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2022. № 1. С. 40–47. EDN TZNLVQ.

Дата поступления: 13.01.2026

Решение о публикации: 17.02.2026

Контактная информация:

ЛАПИДУС Борис Моисеевич — д-р экон. наук, профессор, председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»; lapidusbm@mail.ru

ОСЬМИНИН Александр Трофимович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры УЭР ПГУПС; at@osminin.com

ОСЬМИНИНА Ирина Ивановна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры УЭР ПГУПС; osminina@inbox.ru

МАЛАХОВА Татьяна Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры УЭР ПГУПС; malakhova2004@yandex.ru

On the issue of increasing the speed of freight shipments

B. M. Lapidus¹, A. T. Osminin^{1,2}, I. I. Osminina², T. A. Malakhova²

¹Joint Stock Company “Research and Design Institute of Railway Transport” (JSC VNIIZHT), 10 3rd Mytishchinskaya str., Moscow, 129626, Russia

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

For citation: Lapidus B. M., Osminin A. T., Osminina I. I., Malakhova T. A. On the Issue of Increasing the Speed of Freight Shipments // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 108–116. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-108-116. (In Russian)

Abstract

Objective: to examine the issue of accelerating freight shipping flows by rail. To achieve this objective, key factors that negatively affect delivery speed were identified. **Methods:** collection, comparison, and

systematization of data on the operating speeds of freight trains. **Results:** the research concluded that a differentiated approach is required for the development of measures to accelerate freight transport flows as well as a comprehensive strategy is necessary to address the specific challenges of per-wagon load consignments. A classification of factors affecting freight delivery speed has been proposed, and the principal directions for measures to increase train speeds have been substantiated. It is emphasized that acceleration of flows is directly influenced by organizational arrangements, technology, data culture, the scaling of digital technologies, and personnel qualifications. **Practical importance:** the study demonstrates the necessity to revise existing approaches to train scheduling and to develop adaptive, forecast-driven digital models. A comprehensive scientific approach to logistics optimization and transport management, together with the deployment of intelligent AI-based solutions in transportation, can significantly improve rail-freight delivery speed.

Keywords: delivery speed, key reasons, objective factors, changeable factors, digitalization, electronic services

References

1. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federatsii do 2030 g. s prognozom na period do 2035 g.: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 27.11.2021 no. 3363-r. (In Russian)
2. Lapidus B. M. Zadachi operezhayushchego razvitiya rossijskikh zheleznykh dorog // Zheleznodorozhnyj transport. 2023. No. 2. S. 4–14. EDN HYHHML. (In Russian)
3. Charkin E. I. O realizatsii strategii tsifrovoy transformatsii OAO "RZhD" // Zheleznodorozhnyj transport. 2020. No. 2. S. 66–70. EDN VFXUOZ. (In Russian)
4. O perspektivakh razrabotki i primeneniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta pri realizatsii transportno-logisticheskikh zadach v sfere gruzovykh perezovok / B. M. Lapidus [i dr.] // Zheleznodorozhnyj transport. 2025. No. 5. S. 4–12. EDN HJDXVF. (In Russian)
5. Lapidus B. M. Sozdanie intellektual'noj integrirovannoj transportnoj sistemy -proryvnoe innovatsionnoe reshenie // Zheleznodorozhnyj transport. 2020. No. 12. S. 26–33. EDN ZHSCIW. (In Russian)
6. Surodin Yu. N. O nauchno-prakticheskikh zadachakh OAO "RZhD" v sfere elektronnoho dokumentooborota pri perezovkakh gruzov v mezhdunarodnom soobshchenii // Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD". 2020. No. 1–2. S. 27–34. EDN GMFEGF. (In Russian)
7. Lapidus B. M., Os'minin A. T., Adadurov S. E. Tsifrovaya transformatsiya perezovoch-nogo protsessa s uchetom razvitiya Dinamicheskoy modeli zagruzki infrastruktury OAO "RZhD" // Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD". 2020. No. 3–4. S. 1–21. EDN GKAEUA. (In Russian)
8. Vinogradov S. A., Anfinogenov A. Yu., Kiryakin V. Yu. Ispol'zovanie tekhnologii bol'shikh dannykh pri razrabotke variantnykh grafikov dvizheniya poezdov i prediktivnoj analitike zagruzki infrastruktury // Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD". 2022. No. 1. S. 40–47. EDN TZNLVQ. (In Russian)

Received: 13.01.2026

Accepted: 17.02.2026

Author's information:

Boris M. LAPIDUS — Dr. Sci. in Economic, Professor, Chairman of the Joint Academic Council of "Russian Railways" JSC; lapidusbm@mail.ru
 Alexander T. OSMININ — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department of UER, PGUPS; at@osminin.com
 Irina I. OSMININA — PhD in Engineering; Senior Researcher, Department of UER, PGUPS; osminina@inbox.ru
 Tatyana A. MALAKHOVA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of UER, PGUPS; malakhova2004@yandex.ru

УДК 625.033.34

О необходимости учета типа грузовых вагонов при выборе вида статистического распределения вертикальных сил воздействия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН

А. Ю. Антонов, Л. С. Блажко

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

Для цитирования: Антонов А. Ю., Блажко Л. С. О необходимости учета типа грузовых вагонов при выборе вида статистического распределения вертикальных сил воздействия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 117–125. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-117-125

Аннотация

Цель: выбор вида статистического распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс при движении грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН. **Методы:** по результатам эксперимента были определены вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс, возникающие при движении грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН. В зависимости от условий эксплуатации результаты эксперимента распределены по группам (массивам данных). Для каждого из них была выполнена статистическая обработка. **Результаты:** по итогам статистической обработки определено, что на вид распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс существенное влияние оказывает тип грузового вагона (цистерна, хоппер-дозатор, полувагон). В ряде случаев фактическое распределение вертикальных сил не соответствует нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса), в соответствии с которым осуществляется определение показателей напряженно-деформированного состояния пути, что, в свою очередь, может приводить к ошибкам в расчете напряжений и, как следствие, принятию нерациональных решений при организации технического обслуживания железнодорожного пути. Поэтому в соответствии с распределением Вейбулла была выведена аналитическая зависимость максимальной динамической силы воздействия колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) от коэффициентов (параметров) функций распределения Вейбулла, позволяющая наиболее точно определять площадь графика плотности вероятности распределения вертикальных сил. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть применены при определении показателей напряженно-деформированного состояния пути в соответствии с методикой оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности.

Ключевые слова: вертикальные силы воздействия колеса на рельс, расчет пути на прочность, нормальное распределение случайной величины, распределение Вейбулла

Согласно методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности (далее – методика) [1–5], ключевое влияние на определение параметров напряженно-деформированного состояния пути оказывает величина макси-

мальной динамической силы воздействия колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН), которая определяется как сумма среднего значения вертикальной силы $P_{\text{ср}}$ (кН) и среднеквадратического отклонения дополнительных динамических вертикальных сил инерционного характера S , кН,

умноженных на показатель вероятности не превышения максимальной силы λ_{Φ} , принимаемый, как правило, равным 2,5, что соответствует вероятности 0,6 %:

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

Данная формула принята к учету из условия соответствия статистического распределения вертикальных динамических сил взаимодействия пути и подвижного состава нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса).

Методика является одним из инструментов для принятия тех или иных технических решений, таких как:

- планирование этапов усиления конструкции железнодорожного пути;
- оценка напряженно-деформированного состояния конструкции пути при заданных условиях эксплуатации;
- определение нагрузок и скоростей движения поездов, при которых напряжения и деформации железнодорожного пути не будут превосходить допустимых значений;
- определение предельно допустимого тоннажа, после пропуска которого необходимо назначать ремонты пути;
- анализ причин схода подвижного состава, а также причин нарушения прочности и устойчивости железнодорожного пути [6–9].

Следовательно, весомую роль играют не только значения напряжений, получаемые в результате решения всей последовательности расчета пути на прочность, но и промежуточные результаты расчета — значения средних сил и изгибающих моментов.

Поэтому с целью проверки соответствия распределения вертикальных сил, определенных в результате эксперимента, нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса) был выполнен статистический анализ результатов измерения силового воз-

действия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН.

Проверка гипотезы о применимости нормального закона распределения случайной величины при статистической обработке результатов экспериментального определения вертикальных сил воздействия колеса на рельс на участке обращения грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН

В период с июня 2022 года по октябрь 2023 года на участке с 128-го км ПК 9 + 38,00 по 129-й км ПК 3 + 49,00 (кривая радиусом 620 м с уклоном 6,8 ‰) перегона Веймарн — Котлы-2 направления Веймарн — Усть-Луга, расположенного в Кингисеппском районе Ленинградской области, сотрудниками кафедры «Железнодорожный путь» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» проводилась комплексная оценка влияния длинносоставных и тяжеловесных поездов, сформированных из вагонов с осевой нагрузкой 230,5 кН и 245,0 кН, на изменение показателей вертикальных сил воздействия колеса на рельс [10–11].

Участок проведения эксперимента имел следующие характеристики: рельсы Р65, промежуточные скрепления АРС-4, железобетонные шпалы (эпюра — 2000 шт./км), расстояние между осями шпал — 51 см, балластный слой — щебеночный с толщиной 50 см под шпалой. Грузонапряженность — 139,9 млн т брутто на км в год, пропущенный тоннаж — 785,2 млн т брутто. По данным прохода вагона-путеизмерителя, на момент проведения эксперимента фактический радиус кривой составлял 632 м.

В ходе эксперимента записывались вертикальные динамические силы, которые возникают от действия колес подвижного состава, не имеющих неровности на поверхности катания

и приводящих к ударно-динамическому взаимодействию колеса и рельса. Следовательно, величина вертикальной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) формировалась только за счет дополнительных сил инерции неподрессоренных масс, возникающих при прохождении колесом изолированной неровности на пути $P_{\text{ни}}$ (кН), а также из-за наличия непрерывных неровностей на поверхности катания колес $P_{\text{ник}}$ (кН) и раскатанных неровностей на поверхности катания колес $P_{\text{инк}}$ (кН), что соответствует условиям методики.

На участке проведения эксперимента обрабатывались четырехосные грузовые поезда с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН, состоящие из цистерн, хоппер-дозаторов и полувагонов. Средние скорости движения были равны 61,3 км/ч для цистерн, 54 км/ч для хоппер-дозаторов и 48,2 км/ч для полувагонов. Расчетный модуль упругости подрельсового основания U составлял 110 МПа для внутреннего рельса кривой и 130 МПа для наружного, а расчетный коэффициент относительной жесткости подрельсового основания и рельса k — 1,3248 и 1,4354 соответственно.

По результатам предварительного анализа распределения вертикальных динамических сил было принято решение о выделении из общего массива данных шести групп результатов в зависимости от типа грузовых вагонов и рельсовой нити (внутренней или наружной) в кривой радиусом $R = 632$ м. В соответствии с методами статистической обработки экспериментальных данных [12–14] были определены статистические показатели: математическое ожидание M_x (кН), дисперсия S^2 , среднеквадратическое отклонение S и коэффициент вариации v (табл. 1).

Для каждой группы были получены гистограммы распределения вертикальных сил (рис. 1–3).

Анализ полученных гистограмм показал, что площади графиков плотности вероятности распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс при обращении грузовых поездов с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН могут быть описаны другими функциями статистических распределений с большей точностью, чем законом нормального распределения случайной величины (закон Гаусса).

ТАБЛИЦА 1. Результаты статистической обработки гистограмм распределения в соответствии с нормальным законом распределения случайной величины и оценка по χ^2 -критерию Пирсона

Группа	1	2	3	4	5	6
Тип грузовых вагонов	Цистерны		Хоппер-дозатор		Полувагоны	
Нить кривой	внутр.	наруж.	внутр.	наруж.	внутр.	наруж.
Число случаев, шт.	867	826	253	242	1436	1368
Математическое ожидание M_x	123,23	100,77	143,64	104,82	133,66	96,57
Ср. кв. отклонение S	23,7	13,2	13,3	11,0	13,9	10,0
Дисперсия S^2	560,3	174,4	177,1	121,2	192,2	99,0
Коэффициент вариации v , %	19,2	13,1	9,3	10,6	10,4	10,3
χ^2 -критерий Пирсона	204,8	45,8	296,7	63,0	1855,4	59,1
Вероятность α	менее 0,01					

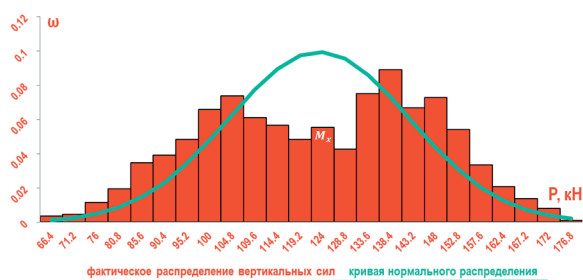


Рис. 1. Гистограмма частот ω распределения вертикальных сил на внутреннюю рельсовую нить кривого участка пути и кривая нормального распределения (цистерны)

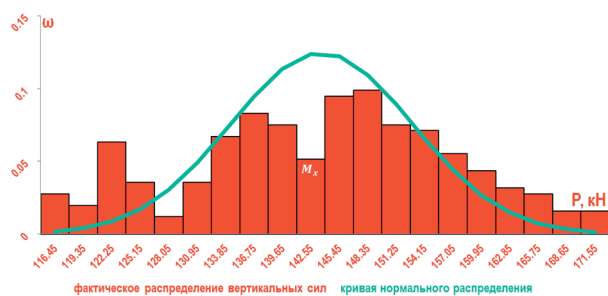


Рис. 2. Гистограмма частот ω распределения вертикальных сил на внутреннюю рельсовую нить кривого участка и кривая нормального распределения (хоппер-дозаторы)

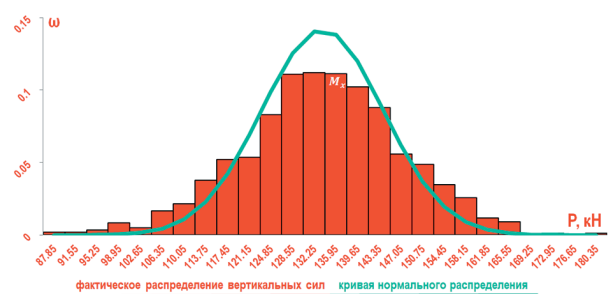


Рис. 3. Гистограмма частот ω распределения вертикальных сил на внутреннюю рельсовую нить кривого участка пути и кривая нормального распределения (полувагоны)

Необходимость поиска альтернативного закона распределения случайных величин объясняется тем, что применение нормального

закона распределения может приводить к неточностям расчета показателей напряженно-деформированного состояния пути:

1. На гистограммах распределения вертикальных сил воздействия колеса на внутренний рельс кривой радиусом 632 м измеренных при обращении грузовых поездов, составленных из цистерн и хоппер-дозаторов (рис. 1–2), наблюдается наличие двух и более вершин (мод). Применение в таком случае величины математического ожидания M_x (кН) вместо моды M_0 (кН) может приводить к неточностям расчета напряжений, так как величина математического ожидания $M_x = P_{\text{ср}}$ (кН) является составляющей формул максимальных эквивалентных сил, учитывающих нагрузку от соседних осей тележки:

$$P_{\text{эkv}}^I = P_{\text{дин}}^{\text{max}} \sum \mu_i P_{\text{ср},i}, \quad (2)$$

$$P_{\text{эkv}}^I = P_{\text{дин}}^{\text{max}} \sum \eta_i P_{\text{ср},i}, \quad (3)$$

где μ_i и η_i — ординаты линии влияния изгибающих моментов рельса и ординаты линии влияния прогибов рельса в сечениях пути, расположенных под колесными нагрузками от осей экипажа, смежных с расчетной осью.

2. На гистограммах распределения вертикальных сил воздействия колеса на внутренний рельс кривой радиусом 632 м измеренных при обращении грузовых поездов, составленных из хоппер-дозаторов и полувагонов (рис. 2–3), заметно, что площади крайних частей графика плотности вероятности существенно превышают площадь графика плотности вероятности нормального распределения. В таком случае вероятность превышения максимальной динамической силы от колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) будет больше 0,6%, что не соответствует заложенным в методику допущениям.

С целью установления соответствия полученных гистограмм распределения вертикаль-

ных сил нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса) была произведена проверка нулевой гипотезы H_0 по χ^2 -критерию Пирсона. Для всех рассматриваемых массивов данных вероятность по χ^2 -критерию Пирсона составила менее 0,01, следовательно, нулевая гипотеза H_0 о нормальном законе распределения случайной величины не подтверждается (табл. 1).

Учитывая, что цистерны, хоппер-дозаторы и полувагоны составляют 100 %-ную долю в потоке грузовых поездов, обрабатываемых на экспериментальном участке, появляется необходимость поиска вида статистического распределения, позволяющего с большей точностью производить описание графика плотности вероятности распределения вертикальных сил, чем закон Гаусса.

Описание площади графика плотности вероятности распределения вертикальных сил воздействия подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН в соответствии с распределением Вейбулла

Распределение Вейбулла получило широкое распространение в теории надежности, изучающей закономерности распределения отказов технических устройств и конструкций, причины и модели их возникновения.

Плотность вероятности распределения при $x > 0$ равна:

$$f(x) = \frac{k}{x} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^k \right), \quad (4)$$

где e — число Эйлера (2,71828...),

λ — коэффициент масштаба,

k — коэффициент формы,

x — определяемый параметр.

Функция распределения при $x > 0$ равна:

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^k \right). \quad (5)$$

В соответствии с результатами статистической обработки гистограмм распределения вертикальных сил воздействия колеса на рельс (рис. 1–3) и РД 26.260.004-91 «Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации» [15] были определены значения величин коэффициентов масштаба λ и формы k .

Далее по χ^2 -критерию Пирсона была произведена проверка нулевой гипотезы H_0 о соответствии распределения вертикальных динамических сил взаимодействия колеса и рельса, возникающих при проходе подвижного состава с осевой нагрузкой 235–250 кН, согласно распределению Вейбулла, и выполнен подбор значений коэффициентов масштаба λ и формы k соответствующим наименьшим значениям по χ^2 -критерию Пирсона.

В результате исследования было определено, что применение закона распределения Вейбулла позволяет более точно производить описание площади графика плотности вероятности распределения вертикальных сил. Так, например, при $k = 8,9$ и $\lambda = 0,958$ величина соответствия фактического распределения вертикальных сил при движении грузовых поездов, составленных из полувагонов, по внутренней нити кривой по χ^2 -критерию Пирсона составила 141,12 (для кривой нормального распределения она была равна 1855,40 (рис. 4).

Следовательно, можно говорить о том, что выражение функции двухпараметрического распределения Вейбулла допустимо использовать для статистического описания распределения вертикальных динамических сил взаимодействия колеса и рельса.

С целью вывода практической формулы, предназначенной для определения максимально вероятной динамической силы воздействия колеса на рельс, сформулируем задачу

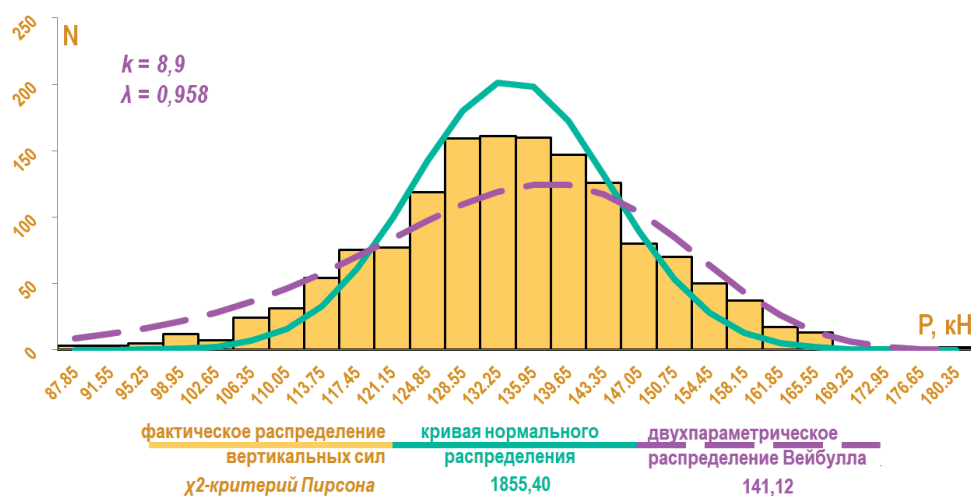


Рис. 4. Гистограмма частот N распределения вертикальных (полувагоны, внутренняя нить), кривые нормального распределения и распределения Вейбулла

определить величину $x = P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН), которая с вероятностью α будет соответствовать фактической максимальной динамической силе P_{α} .

$$P(P_{\text{дин}}^{\text{max}} \geq P_{1-\alpha}). \quad (6)$$

Искомая вероятность может быть найдена с использованием функции распределения:

$$F(P_{\text{дин}}^{\text{max}} \geq P_{\alpha=0,006}) = 1 - F(P_{\text{дин}}^{\text{max}} < P_{\alpha=0,994}) =$$

$$= 1 - \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{P_{\text{дин}}^{\text{max}}}{\frac{P_{Mx}}{\lambda}} \right)^k \right) \right) = \exp \left(- \left(\frac{P_{\text{дин}}^{\text{max}}}{\frac{P_{Mx}}{\lambda}} \right)^k \right) = \alpha. \quad (7)$$

Таким образом, формула максимально вероятной динамической силы воздействия колеса на рельс $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) примет вид:

$$P_{\text{дин}}^{\text{max}} = \frac{P_{Mx}}{\lambda} \cdot \sqrt[k]{\ln \frac{1}{\alpha}}, \quad (8)$$

где P_{Mx} — математическое ожидание распределения Вейбулла.

Отметим, что при $\lambda=1$ теоретическая кривая распределения Вейбулла сместится и математическое ожидание распределения Вейбулла P_{Mx} будет соответствовать среднему значению вертикальной динамической силы воздействия колеса на рельс P_{cp} (кН). Следовательно, для приближенного вычисления величины $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) может быть рекомендована формула

$$P_{\text{дин}}^{\text{max}} = P_{\text{cp}} \cdot 5,116^{\frac{1}{k}}, \quad (9)$$

где k — коэффициент формы распределения Вейбулла.

В соответствии с результатами эксперимента заданная вероятность непревышения величины максимально вероятной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) (0,6 %) обеспечивается для внутреннего и наружного рельсов, соответственно при k , равном 4,4 и 4,7 для цистерн, 8,8 и 5,2 для хоппер-дозаторов и 5,3 и 5,3 для полувагонов.

Это говорит о том, что предложенная функциональная зависимость может быть применена для определения величины максимальной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) при расчете пути на прочность.

Заключение

По итогам статистической обработки результатов измерения силового воздействия на путь подвижного состава с осевой нагрузкой 230,5–245,0 кН было определено, что при прочих равных условиях (одно и то же поперечное сечение пути, одинаковые значения скоростей движения и осевых нагрузок) на вид статистического распределения вертикальных сил оказывает влияние тип грузового вагона, предназначенного для перевозки того или иного вида груза (цистерна, хоппер-дозатор, полувагон), способного перемещаться в пределах вагона (жидкий, газообразный, сыпучий груз) в процессе движения подвижного состава.

В ряде случаев распределение вертикальных сил воздействия колеса на рельс не соответствует нормальному закону распределения случайной величины (закону Гаусса), что может приводить к ошибкам в определении величин напряжений в элементах верхнего строения пути. Поэтому был рассмотрен вопрос о необходимости поиска статистического закона, позволяющего учитывать тип вагона грузового поезда при определении показателей напряженно-деформированного состояния пути.

Для более точного определения площади графика плотности вероятности распределения вертикальных сил воздействия подвижного состава на путь и величину максимальной динамической силы $P_{\text{дин}}^{\text{max}}$ (кН) в соответствии с распределением Вейбулла была получена функциональная зависимость, которая может быть использована при определении показателей напряженно-деформированного состояния пути, а также определены значения коэффициентов формы k и масштаба λ для грузовых поездов, имеющих в составе различные типы вагонов: цистерны, хоппер-дозаторы и полувагоны.

Список источников

1. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706р.
2. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. МПС РФ от 16.06.2000 № ЦПТ–52/14. М., 2000. 40 с.
3. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 1. С. 26–30.
4. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 2. С. 38–40.
5. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 3. С. 34–37.
6. Клинов С.И. Расчеты верхнего строения пути на прочность и устойчивость: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. М.: МИИТ, 1984. 115 с.
7. Шахунянц Г.М. Устройство железнодорожного пути: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Трансжелдориздат, 1944. 481 с.
8. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
9. Амелин С.В., Яковлева Т.Г., Шульга В.Я. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1990. 367 с.
10. Отчет о научно-исследовательской работе «Выполнение второго этапа испытаний для формирования данных по сравнению динамического воздействия (в том числе сил, напряжений в элементах верхнего строения пути и земляного полотна, параметров вибрации) на участках пути с различным грузооборотом для вагонов с осевой нагрузкой 25 тс на участках Октябрьской железной дороги». СПб.: ПГУПС, 2023. 219 с.
11. Отчет по работе «Оптимизация взаимодействия в системе «колесо — рельс», разработка и актуализация

нормативных документов ОАО «РЖД» в рамках повышения несущей способности и эксплуатационного ресурса верхнего строения пути». СПб.: ПГУПС, 2023. 303 с.

12. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.

13. Кокс Д., Льюис П. Статистический анализ последовательности событий / пер. с англ. И. А. Маховой и В. В. Рыкова, под ред. Н. П. Бусленко. М.: Мир, 1969. 312 с.

14. Шорохова И. С., Кисляк Н. В., Мариев О. С. Статистические методы анализа: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 300 с.

15. РД 26.260.004-91, методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.

Дата поступления: 26.01.2026

Решение о публикации: 28.02.2026

Контактная информация:

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

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

Accounting for the type of freight wagons in determining the statistical distribution of vertical track forces generated by rolling stock with axial loads of 230.5–245.0 kN

A. Yu. Antonov, L. S. Blazhko

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

For citation: Antonov A. Yu., Blazhko L. S. Accounting for the Type of Freight Wagons in Determining the Statistical Distribution of Vertical Track Forces Generated by Rolling Stock with Axial Loads of 230.5–245.0 kN // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 117–125. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-117-125. (In Russian)

Abstract

Objective: when determining the statistical distribution of vertical forces acting on the track for heavy-haul rolling stock (230.5–245.0 kN axial load), it is essential to account for the specific type of freight wagons. **Methods:** vertical dynamic wheel-rail forces generated by freight trains with axial loads of 230.5–245.0 kN were measured experimentally. Subsets of the observed data were separated based on wagon type and operational conditions. Separate statistical analysis was performed on each subset. **Results:** statistical analysis indicated that wagon type (tank, hopper dispenser, or gondola) significantly affects the statistical form of vertical wheel-rail forces. In a number of cases, the actual distribution of vertical forces does not follow the normal probability distribution law (Gaussian distribution), which is traditionally assumed when estimating track stress-strain indicators. Thus, this mismatch may induce errors in stress calculations and, consequently, lead to inefficient decision-making in railway track maintenance planning. To address this, an analytical relation was derived – based on Weibull distribution – linking the maximum dynamic wheel-rail force P_{max} (kN) to the parameters of the Weibull distribution functions. This dependence enables a more accurate determination of the area under the probability density curve of vertical forces. **Practical significance:** the findings of the study can be applied to improve the precision of stress assessments and to inform indicators of the stress-strain state of the track in accordance with the Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track to ensure its reliability.

Keywords: vertical forces of the wheel on the rail, calculation of the strength path, normal random variable distribution, Weibull distribution

References

1. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 22.12.2017 No. 2706r. (In Russian)

2. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. MPS RF ot 16.06.2000 No. TsPT-52/14. M., 2000. 40 s. (In Russian)

3. Obshchie polozheniya metodiki otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po kriteriyam prochnosti i nadezhnosti / V. O. Pevzner [i dr.] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2019. No. 1. S. 26–30. (In Russian)

4. Obshchie polozheniya metodiki otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po kriteriyam prochnosti i nadezhnosti / V. O. Pevzner [i dr.] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2019. No. 2. S. 38–40. (In Russian)

5. Obshchie polozheniya metodiki otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po kriteriyam prochnosti i nadezhnosti / V. O. Pevzner [i dr.] // Put' i putevoe khozyajstvo. 2019. No. 3. S. 34–37. (In Russian)

6. Klinov S. I. Raschety verkhnego stroeniya puti na prochnost' i ustojchivost': uchebnoe posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. M.: MIIT, 1984. 115 s. (In Russian)

7. Shakhunyants G. M. Ustrojstvo zheleznodorozhnogo puti: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta. M.: Transzheldorizdat, 1944. 481 s. (In Russian)

8. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava. M.: Transport, 1986. 559 s. (In Russian)

9. Amelin S. V., Yakovleva T. G., Shul'ga V. Ya. Osnovy ustrojstva i raschetov zheleznodorozhnogo puti. M.: Transport, 1990. 367 s. (In Russian)

10. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote "Vypolnenie vtorogo etapa ispytaniy dlya formirovaniya

dannykh po sravneniyu dinamicheskogo vozdeystviya (v tom chisle sil, napryazhenij v elementakh verkhnego stroeniya puti i zemlyanogo polotna, parametrov vibratsii) na uchastkakh puti s razlichnym gruzooborotom dlya vagonov s osevoj nagruzkoj 25 ts na uchastkakh Oktyabr'skoj zheleznoj dorogi". SPb.: PGUPS, 2023. 219 s. (In Russian)

11. Otchet po rabote "Optimizatsiya vzaimodeystviya v sisteme "koleso — rel's", razrabotka i aktualizatsiya normativnykh dokumentov OAO "RZhD" v ramkakh povysheniya nesushchej sposobnosti i ekspluatatsionnogo resursa verkhnego stroeniya puti". SPb.: PGUPS, 2023. 303 s. (In Russian)

12. Kremer N. Sh. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po ekonomicheskim spetsial'nostyam. 3-e izd., pererab. i dop. M.: YUNITI-DANA, 2010. 551 s. (In Russian)

13. Koks D., L'yuis P. Statisticheskij analiz posledovatel'nosti sobytij / per. s angl. I. A. Makhovoj i V. V. Rykova, pod red. N. P. Buslenko. M.: Mir, 1969. 312 s. (In Russian)

14. Shorokhova I. S., Kislyak N. V., Mariev O. S. Statisticheskie metody analiza: uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015. 300 s. (In Russian)

15. RD 26.260.004-91, metodicheskie ukazaniya. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii. (In Russian)

Received: 26.01.2026

Accepted: 28.02.2026

Author's information:

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

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

УДК 624,21

Работа эстакад высокоскоростных железнодорожных магистралей на продольные сейсмические воздействия

В. Н. Смирнов, А. А. Голубев

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

Для цитирования: Смирнов В. Н., Голубев А. А. Работа эстакад высокоскоростных железнодорожных магистралей на продольные сейсмические воздействия // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 126–131. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-126-131

Аннотация

Цель: учет работы бесстыкового пути на эстакадах высокоскоростных железнодорожных магистралей на сейсмические воздействия вдоль оси пути. **Методы:** разработка методики расчета пролетных эстакад с бесстыковым путем на продольные сейсмические воздействия с анализом поведения системы «мост — бесстыковой путь». **Результаты:** методики расчета эстакады с бесстыковым путем на продольные сейсмические силы. **Практическая значимость:** получение методики расчета эстакад с бесстыковым путем на продольные сейсмические воздействия.

Ключевые слова: эстакада, бесстыковой путь, сейсмические воздействия

Для высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ), по опыту, необходимо сооружение большого количества многопролетных эстакад [1–3].

При определенных условиях (слабые грунты, большие высокие насыпи) эстакады становятся предпочтительнее земляного полотна как по техническим, так и по экономическим показателям. Однако бесстыковой путь, объединяя элементы сооружения в единую систему «мост — бесстыковой путь» (МБП), обуславливает в случае продольных (вдоль оси моста) воздействий появление дополнительных усилий в элементах системы МБП, особенно в рельсовом пути [4, 5].

В случае действия сейсмических нагрузок вдоль оси пути рельсовый путь в расчетах сейсмостойкости сооружений не учитывается. Это объясняется ограниченной несущей способностью рельсового пути, а также извест-

ными из практики землетрясений случаями разрушения подходов к мосту (эстакад) даже при сохранении неповрежденными мостовых конструкций.

Однако это можно учесть, если в расчетной схеме мостового сооружения рассмотреть единую систему «эстакада — бесстыковой путь», а сопротивление сдвигу рельсового пути признать отсутствующим, что соответствует разрыву рельсовой плети над устоями.

В соответствии со СНиП [6] расчеты сейсмической стойкости сооружения выполняются на условные показатели сейсмической нагрузки, определяемые исходя из допущений об упругом деформировании системы.

В случае железнодорожной эстакады, рассматриваемой в виде единой упругой системы, рельсовый путь можно смоделировать брусом на основании, упругом в направлении вдоль оси пути. Сейсмическая нагрузка на опоры

будет определяться исходя из динамических свойств не отдельной опоры в виде консольных стоек (как это принято традиционно), а элементов единой системы «рельсовый путь — пролетные строения — опоры» без учета работы рельсов на подходах к эстакаде.

Ввиду наличия на мосту рельсового пути, моделируемого брусом и упруго скрепленного с пролетными строениями в их верхней части, эстакаду можно представить как статически неопределимую систему (рис. 1).

Сейсмические нагрузки S , определяемые по нормам [6], являются для этой системы внешними силами. Раскрывая статическую неопределимость системы, например, методом сил, можно определить продольные усилия в рельсах и найти горизонтальные нагрузки на опоры R эстакады по каждой форме колебаний в соответствии с формулой:

$$R_0 = S_m + X_{m+1} - X_m,$$

где S_m — нагрузка на каждую опору от действия сейсмических сил в направлении вдоль оси пути.

В качестве неизвестных принимаются продольные усилия в рельсах X_1, X_2, \dots, X_n , вследствие чего основная система будет иметь вид, приведенный на рис. 1.

Систему разрешающих уравнений при этом можно записать в виде:

$$D_x + d = 0,$$

откуда

$$x = -D^{-1}d.$$

Здесь матрицы d и D имеют вид:

$$d = \{\Delta_1 \Delta_2 \dots \Delta_n\};$$

$$D = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & & & & \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & & & \\ & \delta_{32} & \delta_{33} & \delta_{34} & & \\ & & \dots & \dots & \dots & \\ & & \delta_{mm-1} & \delta_{mm} & \delta_{m+1} & \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & \delta_{kk-1} & \delta_{kk} \end{pmatrix},$$

где m — номер опоры;

K — число опор эстакады;

Δ — грузовые перемещения.

Элементы матрицы D слагаются из единичных перемещений верха опор (δ_0), концов пролетных строений ($\delta_{\text{пс}}$) и рельсового пути относительно пролетных строений (α, β) [9].

В простейшем случае одноступенчатой опоры на жестком основании перемещение верха опоры:

$$\delta_0 = \frac{H_0^3}{3EI_0},$$

где H_0, EI_0 — высота опоры.

Выражения для α, β имеют вид [9]:

$$\alpha_{m+1} = \frac{\gamma_{m+1}}{U} \cdot \frac{ch\gamma_{m+1} U l_{m+1}}{sh\gamma_{m+1} l_{m+1}},$$

$$\beta_{m+1} = \frac{\gamma_{m+1}}{U} \cdot \frac{1}{sh\gamma l_{m+1}},$$

где U — продольный модуль упругости пути на мосту;

l — длина пролетного строения;

m — номер опоры.

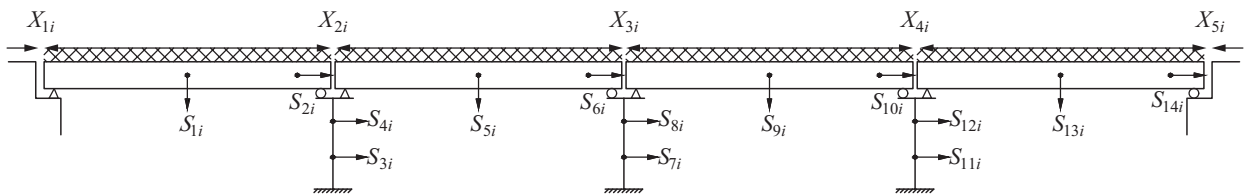


Рис. 1. Расчетная схема железнодорожного моста при расчетах на продольные сейсмические воздействия

Значение коэффициента γ определяется из выражения:

$$\gamma = \sqrt{\frac{U}{2EF_p}},$$

где EF_p — жесткость рельса.

Перемещение конца пролетного строения δ_{nc} по величине значительно меньше, чем перемещение верха опоры δ_0 и пути относительно верха пролетного строения:

$$\delta_{nc} = \frac{l}{E_6 F_6},$$

где l_6, E_6, F_6 — соответственно длина, модуль упругости материала и площадь поперечного сечения пролетного строения.

Выражение для грузового перемещения Δ получит вид:

$$\Delta = \frac{l}{E_6 F_6} + R_{m-1} \delta_{m-1} - R_m \delta_{0,m},$$

где $R_m \delta_{0,m}$ — соответственно реакция и единичное перемещение верха m -й опоры в основной системе метода сил от продольной нагрузки, загружающей пролет $m + 1$.

После определения усилий в рельсах X отыскиваются значения реакций опор (горизонтальных нагрузок на опоры) в статически неопределимой системе по формуле:

$$R_0 = T_m + X_{m+1} - X_m,$$

где T_m — горизонтальная нагрузка на m -ю опору от продольных сил в статически определимой системе (включая сейсмическую);

X_m, X_{m+1} — продольное усилие в рельсах соответственно над m -й и $m+1$ -й опорами.

Горизонтальная нагрузка на опору T_m определяется сочетанием тормозных и сейсмических сил. Тормозная сила в статически определимой системе рассчитывается по формуле [10]:

$$T_{m,1} = \gamma_f \cdot v \cdot K \cdot (1 + \mu) \cdot \eta \cdot 0,1,$$

где γ_f — коэффициент надежности по нагрузке;

v — эквивалентная временная вертикальная нагрузка СК-го подвижного состава для класса нагрузки; $K = 1$;

K — класс подвижной нагрузки СК (для ВСМ $K = 8$);

$1 + \mu$ — динамический коэффициент;

η — коэффициент сочетания временных нагрузок.

Сейсмическая нагрузка на опору в статически определимой системе рассчитывается по формуле [6]:

$$T_{m,2} = K_1 \cdot K_2 \cdot S_{0ij} \cdot \eta,$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий допустимый уровень повреждаемости сооружения;

K_2 — коэффициент, учитывающий особенности конструкции объекта;

η — коэффициент сочетания временных нагрузок [10];

S_{0ij} — сейсмическая нагрузка для i -го тона собственных колебаний системы, определяемая по формуле:

$$S_{0ij} = Q_j \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_\psi \cdot \eta_{ij},$$

где Q_j — части сооружения, определенные к точке j ;

A — коэффициент, принимаемый равным 0,1, 0,2, 0,4 соответственно для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов;

K_ψ — коэффициент, учитывающий диссипативные свойства конструкций и их оснований (1,0–1,5);

η_{ij} — коэффициент формы сооружения при колебаниях по i -му тону собственных колебаний;

β_i — коэффициент динамичности, соответствующий i -му тону собственных колебаний сооружения, определяемый по формуле:

$$0,8 \leq \beta_i = 1,1 / T_i \leq 2,7,$$

где T_i — период собственных колебаний сооружения по i -му тону.

По данной методике, позволяющей учитывать работу рельсового пути на эстакаде с ездой поверху на балласте при сейсмических воздействиях, выполнены расчеты сейсмостойкости ряда многопролетных эстакад.

При этом рассматривались сооружения с железобетонными пролетными строениями длиной 27,6 и 34,2 м. Опоры варьировались по высоте в пределах от 17,85 до 32,35 м. Устои принимались абсолютно жесткими. Величина продольного модуля упругости подрельсового основания принималась $U = 26$ МПа, что соответствует случаю устройства пути на мостах с применением железобетонных шпал на щебеночном балласте и скреплении раздельного типа (рельсы типа Р-65).

В результате расчетов установлено, что возникающие при сочетании сейсмического и тормозного воздействия подвижного состава продольные усилия в рельсах бесстыкового пути возрастают:

- с уменьшением продольной вдоль оси пути жесткости промежуточных опор;

- с увеличением длины эстакады;
- с увеличением жесткости связей (продольного модуля упругости U) между рельсом и подрельсовым основанием.

Допустимая (предельно возможная) величина продольного усилия в рельсах бесстыкового пути при сейсмических и тормозных воздействиях выявляется как разница допускаемых и фактических напряжений в рельсах от временной вертикальной нагрузки (для восприятия которой, собственно, и предназначается рельсовый путь).

Отсюда следует, что эффект от учета работы рельсового пути при расчетах сейсмостойкости эстакады может иметь место лишь в определенных условиях: при сооружениях ограниченной длины и при достаточно жестких в направлении вдоль оси пути опорах (рис. 2):

$$R_0 = f(0,8N_S + 0,7N_T), \text{ кН.}$$

Расчеты показывают, что при длине эстакады до 150–180 м при расчетной сейсмичности

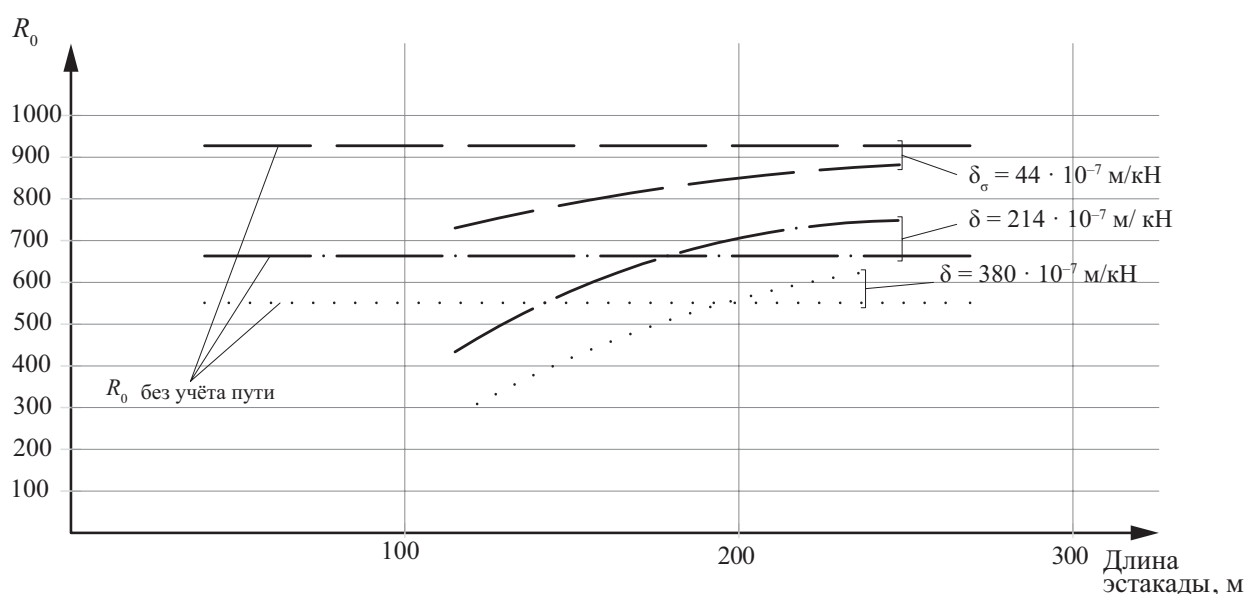


Рис. 2. Максимальные горизонтальные нагрузки на промежуточные опоры железнодорожной эстакады в зависимости от податливости опор вдоль оси пути при балках длиной 34,2 м

до 6–7 баллов вместо традиционной расчетной схемы эстакады, принимаемой в виде ряда консольных стоек, целесообразно использовать многопролетную, статически неопределимую систему, что позволяет проектировать опоры эстакады более экономичными. При эстакадной длине больше 150 м усилия в рельсах становятся чрезмерно большими. В этом случае следует предусматривать специальные конструктивные мероприятия, обеспечивающие сейсмостойкость сооружения (например, сейсмоизоляцию).

Заключение

При проектировании в сейсмически опасных районах многопролетных эстакад на высокоскоростных железнодорожных магистралях с бесстыковым путем целесообразно рассматривать сооружение как единую систему «мост — бесстыковой путь» при длинах эстакады до 150–180 м. В этом случае при землетрясениях амплитудой до 8 баллов рельсовый путь на мосту, объединяя эстакады в единую систему, позволяет проектировать опоры эстакады более экономичными. Статическую неопределимость системы «мост — бесстыковой путь» можно раскрывать, применяя, например, метод сил, при этом определяются продольные усилия в рельсах и горизонтальные нагрузки на опоры. При превышении допустимых значений величины продольных усилий в рельсах учитывать бесстыковой путь в расчетах сейсмостойкости эстакад нельзя.

Список источников

1. Мосты на высокоскоростных линиях железнодорожных магистралей / В. Н. Смирнов [и др.]. СПб.: ПГУПС, 2015. 297 с.
2. Специальные технические условия. Сооружение искусственных участков Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Мо-

сква — Казань — Екатеринбург: технические нормы и требования к проектированию и строительству. СПб.: ПГУПС, 2014. 76 с.

3. Особенности проектирования строительства мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей Москва — Казань / А. В. Бенин [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. Вып. 4 (45). С. 15–20.

4. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовыми сооружениями на высокоскоростных магистралях. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 96 с.

5. Смирнов В. Н. Исследование работы мостов с бесстыковым путем // Путь и путевое хозяйство. 2018. С. 15–17.

6. СНиП П-7-81*. Строительство в сейсмических районах. М., 1982. 49 с.

7. Уздин А. М., Елизаров С. В., Белаш Т. А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений: учебное пособие. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 501 с.

8. Поляков С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1983. 304 с.

9. Крюков Е. П. Брус в упругой среде, сопротивляющийся продольным смещениям. М., 1958. Вып. 7. 66 с.

10. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы (актуализированная редакция). М., 2011.

Дата поступления: 27.11.2025

Решение о публикации: 07.02.2026

Контактная информация:

ГОЛУБЕВ Алексей Александрович — аспирант;
alexegolubev111@gmail.com
СМИРНОВ Владимир Николаевич —
д-р техн. наук, профессор;
svn193921@rambler.ru

Response of high-speed railway viaducts to longitudinal seismic loading

V. N. Smirnov, A. A. Golubev

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

For citation: *Smirnov V. N., Golubev A. A.* Response of high-speed railway viaducts to longitudinal seismic loading // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 126–131. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-126-131. (In Russian)

Abstract

Objective: to account for the behavior of continuous welded rail (CWR) on high-speed railway viaducts under seismic actions along the track axis. **Methods:** development of a calculation methodology that includes a behavior analysis of the “bridge — CWR” system for span-type viaducts with continuous welded rails under longitudinal seismic actions. **Results:** calculation procedures for viaducts with continuous welded rails under longitudinal seismic forces. **Practical significance:** provision of a framework for the design and analysis of viaducts with continuous welded rails under longitudinal seismic actions.

Keywords: viaduct, continuous welded rail track, seismic actions

References

1. Mosty na vysokoskorostnykh liniyakh zheleznodorozhnykh magistralей / V. N. Smirnov [i dr.]. SPb.: PGUPS, 2015. 297 s. (In Russian)
2. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya. Sooruzhenie iskusstvennykh uchastkov Moskva — Kazan' vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva — Kazan' — Ekaterinburg: tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu. SPb.: PGUPS, 2014. 76 s. (In Russian)
3. Osobennosti proektirovaniya stroitel'stva mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей Moskva — Kazan' / A.V. Benin [i dr.] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2015. Vyp. 4 (45). S. 15–20. (In Russian)
4. Smirnov V.N. Vzaimodejstvie besstykovogo puti s mostovymi sooruzheniyami na vysokoskorostnykh magistralyakh. M.: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2015. 96 s. (In Russian)
5. Smirnov V.N. Issledovanie raboty mostov s besstykovym putem // Put' i putevoe khozyajstvo. 2018. S. 15–17. (In Russian)
6. SNiP II-7-81*. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonakh. M., 1982. 49 s. (In Russian)
7. Uzdin A.M., Elizarov S.V., Belash T.A. Sejsmostojkoe konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzhenij: uchebnoe posobie. M.: Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2012. 501 s. (In Russian)
8. Polyakov S.V. Sejsmostojkie konstruksii zdaniy: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Vyssh. shkola, 1983. 304 s. (In Russian)
9. Kryukov E.P. Brus v uprugoj srede, soprotivlyayushchijsya prodol'nym smeshcheniyam. M., 1958. Vyp. 7. 66 s. (In Russian)
10. SP 35.13330.2011. Mosty i trubyy (aktualizirovannaya redaktsiya). M., 2011. (In Russian)

Received: 27.11.2025

Accepted: 07.02.2026

Author's information:

Alexei A. GOLUBEV — Postgraduate Student;
alexeigolubev111@gmail.com

Vladimir N. SMIRNOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; svn193921@rambler.ru

УДК 625.171:625.143.482

Исследование зависимости затухания ультразвуковых колебаний в зависимости от температуры рельсовой стали

Ходак Б. И., Бельтюков В. П.

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

Для цитирования: Ходак Б. И., Бельтюков В. П. Исследование зависимости затухания ультразвуковых колебаний в зависимости от температуры рельсовой стали // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 132–138. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-132-138

Аннотация

Цель: исследование зависимости затухания ультразвуковых колебаний от температуры рельсовой стали, определение влияния температуры на процесс затухания ультразвуковых колебаний. Разработка метода определения температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути при помощи анализа амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через рельс. **Методы:** проведен анализ теоретических основ распространения ультразвука и влияния температуры рельса на изменение амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через рельс. Проведены натурные измерения с целью проверки теоретических данных. **Результаты:** определена зависимость затухания ультразвуковых колебаний, прошедших через рельс, от температуры рельса. Получена математическая формула, отражающая зависимость амплитуды ультразвука от температуры рельсовой стали. Определены факторы, влияющие на точность полученных результатов. Показано, что учет зависимости амплитуды ультразвука от температуры рельса важен для повышения точности метода оценки температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути. **Практическая значимость:** результаты исследования позволят разработать более точные и надежные методы мониторинга температурных напряжений в бесстыковом пути, а также могут быть использованы для совершенствования метода определения температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути.

Ключевые слова: путевое хозяйство, железнодорожный путь, бесстыковой путь, температурно-напряженное состояние, контроль напряжений

Введение

В современном мире железнодорожный транспорт играет важную роль в обеспечении мобильности населения и грузоперевозок. На данный момент наиболее перспективным является бесстыковое строение железнодорожного пути [1], представляющее из себя удлиненные рельсы, соединенные между собой с помощью сварки. Благодаря такому решению исключаются удары колес в месте стыковки рельс, что снижает динамические нагрузки и увеличивает срок службы материалов. Кроме того, бесстыковой путь позволяет уменьшить шум и вибрации при движении поездов,

а также сократить затраты на обслуживание и ремонт пути. Однако для успешной эксплуатации данного типа пути следует соблюдать ряд требований к его укладке и обслуживанию. В частности, необходимо обеспечить точное соблюдение геометрических параметров, регулярно проводить осмотры и техническое обслуживание, своевременно устранять выявленные дефекты и повреждения. Недостаточный контроль за состоянием бесстыкового пути и нарушение температурного режима его эксплуатации могут привести к выбросу пути в жаркую погоду и разрыву рельсов при понижении температур. Во избежание нарушений

эксплуатации существуют нормы содержания бесстыкового пути [1]. Основой является контроль температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути, так как именно избыточные напряжения могут привести к выбросу. Напряжения в рельсовых плетях определяются по формуле:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot (t_n - t_p), \quad (1)$$

где α — коэффициент расширения рельсовой стали;

E — модуль упругости рельсовой стали;

t_p — температура рельса в момент измерений;

t_n — нейтральная температура рельса, при которой температурные напряжения в рельсе равны нулю.

Существуют различные методы оценки температурных напряжений в рельсах, одним из них является ультразвуковое определение напряжений в рельсовых плетях.

Ультразвуковые способы контроля температурных напряжений

Ультразвук — звуковые волны частотой выше 20 кГц. Существует несколько методов ультразвуковой диагностики [2, 3], которые теоретически возможно использовать для выявления температурных напряжений:

- **метод измерения скорости распространения ультразвука.** Данный метод основан на зависимости скорости распространения ультразвуковой волны от характеристик среды, в том числе и от температурных напряжений;

- **метод измерения амплитуды ультразвука.** Амплитуда ультразвукового сигнала, прошедшего через участок материала, также зависит от его механических свойств.

В данной статье рассматривается зависимость амплитуды ультразвука, распространяющегося в рельсе, от температуры рельса, а также приводятся результаты эксперимен-

тального исследования данной зависимости с последующим анализом результатов.

Теоретические основы распространения ультразвука в твердых телах

Распространение ультразвуковых волн в твердых телах — сложный физический процесс, на который оказывают влияние множество факторов [4]. Также при распространении ультразвука возникают различные эффекты, такие как отражение, преломление, дифракция и интерференция. Основными из них, влияющими на затухание ультразвуковых волн [5], являются:

- 1. Поглощение:** ультразвуковые волны поглощаются средой, в которой они распространяются, это приводит к уменьшению амплитуды ультразвука. Степень поглощения зависит от свойств среды, таких как плотность, вязкость, теплопроводность и многих других.

- 2. Рассеивание:** ультразвуковая волна при прохождении через материал рассеивается на неоднородностях среды, таких как пузырьки воздуха или частицы пыли. Рассеивание приводит к изменению направления распространения волны.

- 3. Отражение:** ультразвуковые волны отражаются от границ раздела сред с разными акустическими свойствами. Отражение также может приводить к уменьшению амплитуды.

Для более точного анализа затухания ультразвука необходимо учитывать все эти факторы и их взаимодействие. Однако можно выделить некоторые общие закономерности [7]:

- с повышением температуры обычно увеличивается поглощение и рассеяние ультразвуковых волн, так как изменяются свойства среды, такие как вязкость и плотность;

- отражение ультразвука также может зависеть от температуры, но эта зависимость менее выражена.

Натурные измерения

Для проверки зависимости затухания ультразвуковых колебаний от температуры рельсов был проведен ряд экспериментов, заключающихся в замере амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через рельс при различных температурах в течение дня. Для исключения влияния механических напряжений, которые возникают в плотно закрепленном рельсе, был выбран свободнолежащий рельс типа Р65 длиной 12,5 м. Измерения проводились при помощи одностороннего дефектоскопа УДС1-РДМ-1М1. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Результаты замеров представлены в табл. 1. Измерения проводились в течение трех дней в утреннее время. Определялась температура рельса, нагреваемого солнечными лучами, а также амплитуда прошедшей через рельс ультразвуковой волны. Время начала измерений, проводимых в первый день, — 10:21–11:48, во второй день — 10:15–12:00, в третий день — 10:15–12:00.

По результатам трех измерений был построен общий график (рис. 2), отражающий зависимость амплитуды принятого сигнала (на оси Y) от температуры рельса (на оси X).

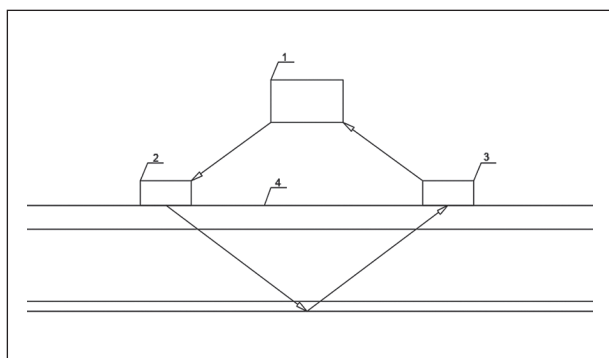


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — вычислительное устройство; 2 — ультразвуковой излучатель; 3 — ультразвуковой приемник; 4 — рельс 12,5 м

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений при повышении температуры рельса

Температура рельса, °С	Амплитуда сигнала, дБ
22,1	9,19
22,3	9,11
23,8	9,07
24,5	9,11
24,7	9,01
25,1	8,99
25,3	8,98
26,3	8,71
26,4	8,88
27,6	8,67
28,1	8,67
28,1	8,65
29,9	8,65
30,1	8,23
30,8	8,04
32,2	8,19
32,3	8,22
33,1	8,03
34,1	8,01
34,2	8,02
34,3	8,08
35,5	7,88
36,2	7,92
36,6	7,99
37,9	7,47
38,2	7,36
38,9	7,48
39,2	7,31
41,3	7,29

После анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что с увеличением температуры рельса на $19,2^{\circ}\text{C}$ происходит линейное уменьшение амплитуды ультразвукового сигнала примерно на $1,9\text{ дБ}$.

На следующем этапе был проведен ряд замеров во время остывания рельса в конце дня. Измерения проводились в течение двух дней в вечернее время. В первый день — 16:20–19:20, во второй день — 16:20–19:40. Результаты представлены в табл. 2.

По результатам первого и второго измерений был построен общий график (рис. 3), отражающий зависимость амплитуды сигнала от температуры рельса.

В полученном графике видно, что при остывании рельса на 20°C происходит увеличение амплитуды ультразвуковой волны на $1,84\text{ дБ}$.

По результатам, полученным в ходе всех экспериментов, был построен общий график, на котором отображены результаты всех измерений (рис. 4), построена линия тренда и выявлена

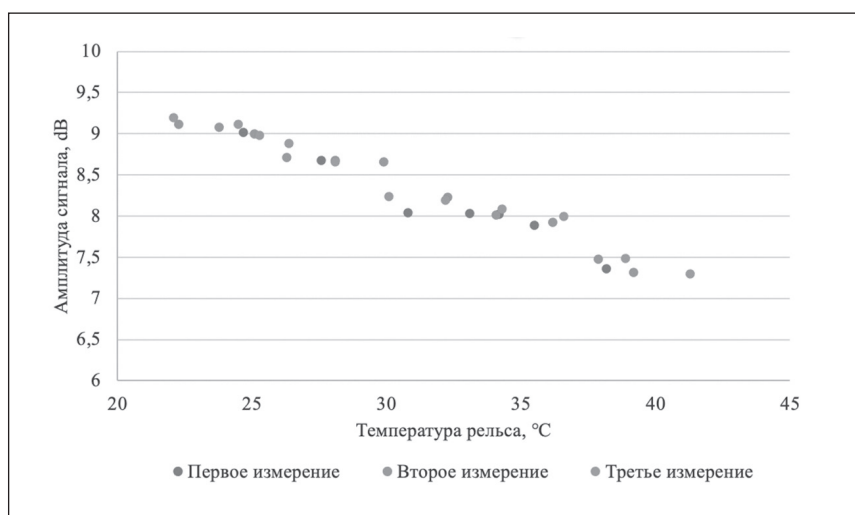


Рис. 2. Графическая зависимость амплитуды сигнала при увеличении температуры рельса

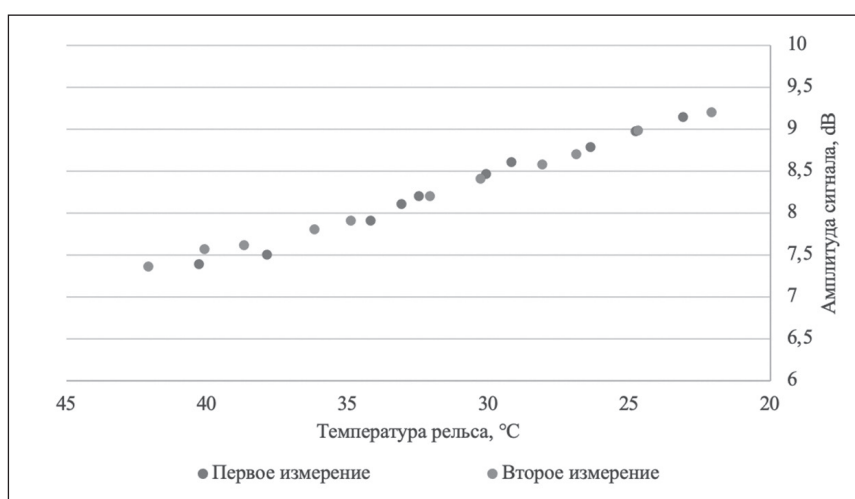


Рис. 3. Графическая зависимость амплитуды сигнала при уменьшении температуры рельса

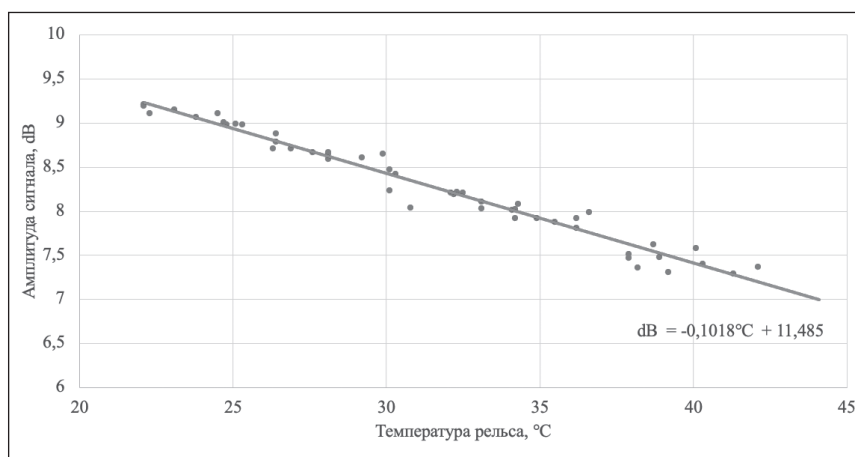


Рис. 4. Графическая зависимость амплитуды сигнала от температуры рельса

ТАБЛИЦА 2. Результаты при понижении температуры рельса

Температура рельса, °С	Амплитуда сигнала, дБ
42,1	7,37
40,3	7,4
40,1	7,58
38,7	7,62
37,9	7,51
36,2	7,81
34,9	7,92
34,2	7,92
33,1	8,11
32,5	8,21
32,1	8,21
30,3	8,42
30,1	8,47
29,2	8,61
28,1	8,59
26,9	8,71
26,4	8,79
24,8	8,98
24,7	8,99
23,1	9,15
22,1	9,21

следующая линейная зависимость (2), описывающая степень затухания ультразвуковой волны в зависимости от температуры рельса:

$$\text{дБ} = -0,1018^\circ\text{C} + 11,485, \quad (2)$$

где °С — относительное изменение температуры рельса;

дБ — относительное изменение амплитуды ультразвукового сигнала.

То есть при изменении температуры рельса на 10 °С амплитуда ультразвуковой волны, прошедшей через рельс, изменяется примерно на 1 дБ. Также стоит отметить, что на полученные результаты могут оказывать влияние тип рельса, сплав, из которого он отлит, и состояние поверхности катания (отшлифованная поверхность, со следами ржавчины и другие различия).

Выводы

По результатам проведенных экспериментов выявлена линейная зависимость (2) влияния температуры рельса на степень затухания амплитуды ультразвукового сигнала. Можно прийти к выводу, что данный способ контроля температурных напряжений труднореализуем на практике и требует высокой точности оборудования, так как изменение амплитуды примерно в 1 дБ на 10 °С

трудноразличимо, что может создать проблемы при попытке сплошного контроля амплитуды при помощи передвижных средств диагностики. Тем не менее можно сделать вывод о том, что амплитуда ультразвука зависит от температуры рельса, но, к сожалению, изменения в затухании ультразвуковых колебаний, вызванные именно напряжениями, возникающими в рельсах, будут практически неразличимы на фоне изменения амплитуд, вызванных сторонними факторами, такими как различия в геометрических характеристиках рельсов, неравномерность нагрева сечения рельса в течение дня и помех, вызванных передвижением датчиков вдоль рельса при попытке установить данное устройство на движущиеся средства диагностики.

Список источников

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р)
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Методы акустического контроля металлов / под ред. Н. П. Алешина. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
4. Тюшев А. Н., Дикусар Л. Д. Курс лекций по физике. Ч. 3. Колебания и волны. Волновая оптика: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск: СГГА, 2011. 194 с.
5. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин [и др.]. Киев: Техника, 1981. 415 с.
6. Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрюкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 248 с.
7. Иванов А. И. Поведение металлов при повышенных нестационарных температурах и нагрузках. М.: Metallurgy, 1982. 351 с.
8. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. В. В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986.
9. Щербинский В. Г., Алешин Н. П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989.
10. Выявление скрытых дефектов деталей методом ультразвуковой дефектоскопии / С. В. Кривенков [и др.], 1999.

Дата поступления: 29.11.2025

Решение о публикации: 07.02.2026

Контактная информация:

ХОДАК Борис Игоревич — аспирант;
boris120799@inbox.ru

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Железнодорожный путь»; beltukov@pgups.ru

An investigation into the thermal dependency of ultrasonic vibration attenuation in steel rail

Khodak B. I., Beltiukov V. P.

St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Khodak B. I., Beltiukov V. P.* An investigation into the thermal dependency of ultrasonic vibration attenuation in steel rail // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 132–138. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-132-138. (In Russian)

Abstract

Objective: to explore how temperature variations influence ultrasonic vibration attenuation in rail steel. To propose a methodology for evaluating thermal stresses in continuous welded rails by analyzing the amplitude variations of ultrasonic signals transmitted through the rail structure. **Methods:** the theoretical fundamental principles governing the propagation of ultrasonic waves were examined, with a specific focus on how rail temperature conditions impact on the ultrasonic signal amplitude. Field measurements were carried out to verify the theoretical data. **Results:** a distinct correlation has been established between the rail temperature and the attenuation of ultrasonic vibrations transmitted through the rail. A mathematical expression describing the dependence of ultrasound amplitude on the temperature of the rail steel has been obtained. The study has identified specific variables that could compromise measurement precision. The data demonstrates that integrating temperature-dependent variables into ultrasonic amplitude analysis is crucial for enhancing the precision of current methods used to estimate thermal stresses in continuous welded rail systems. **Practical significance:** the findings of the study will allow the development of more accurate and reliable methods for monitoring thermal stresses in continuous welded rail tracks, and can be used to improve existing techniques for detecting thermal stresses in continuous welded rails.

Keywords: track facilities, railway track, continuous welded track, temperature-stress state, stress control

References

1. Instruktsiya po ustrojstvu, ukladke, sodержaniyu i remontu besstykovogo puti (utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14.12.2016 No. 2544r) (In Russian)
2. Nerazrushayushchij kontrol': spravochnik: v 7 t. / pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 3: Ul'trazvukovoj kontrol'. M.: Mashinostroenie, 2004. 864 s. (In Russian)
3. Metody akusticheskogo kontrolya metallov / pod red. N. P. Aleshina. M.: Mashinostroenie, 1989. 456 s. (In Russian)
4. Tyushev A.N., Dikusar L.D. Kurs lektsij po fizike. Ch. 3. Kolebaniya i volny. Volnovaya optika: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop. Novosibirsk: SGGGA, 2011. 194 s. (In Russian)
5. Eksperimental'nye metody issledovaniya deformatsij i napryazhenij / B.S. Kasatkin [i dr.] Kiev: Tekhnika, 1981. 415 s. (In Russian)
6. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. Ostatechnye napryazheniya v metalloproduksii: ucheb. posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015. 248 s. (In Russian)
7. Ivanov A. I. Povedenie metallov pri povyshennykh nestatsionarnykh temperaturakh i nagruzkakh. M.: Metallurgiya, 1982. 351 s. (In Russian)
8. Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdelij: spravochnik: v 2 kn. Kn. 2 / pod red. V.V. Klyueva. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1986. (In Russian)
9. Shcherbinskij V. G., Aleshin N. P. Ul'trazvukovoj kontrol' svarnykh soedinenij, 2-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1989. (In Russian)
10. Vyyavlenie skrytykh defektov detalej metodom ul'trazvukovoj defektoskopii / S. V. Krivenkov [i dr.], 1999. (In Russian)

Received: 29.11.2025

Accepted: 07.02.2026

Author's information:

Boris I. KHODAK — Postgraduate Student;

boris120799@inbox.ru

Vladimir P. BELTIUKOV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor of the Department of "Railway Track";

beltukov@pgups.ru



УДК 628.27.659

Совершенствование гидравлического расчета металлических водопроводов с использованием программного обеспечения «ГРИТ»

О. А. Продоус, П. П. Якубчик, С. С. Балашов

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

Для цитирования: Продоус О. А., Якубчик П. П., Балашов С. С. Совершенствование гидравлического расчета металлических водопроводов с использованием программного обеспечения «ГРИТ» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 139–145. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-139-145

Аннотация

При длительном использовании металлических сетей водоснабжения на их стенках образуется слой отложений, который со временем увеличивается, что пагубно влияет на основные параметры данной системы. **Цель:** усовершенствовать методику оперативного автоматизированного расчета значений характеристик гидравлического потенциала изношенных водопроводных труб, характеризующихся разными значениями коэффициента эффективности их эксплуатации, а также разработать программное обеспечение для ускорения расчетов. **Методы:** при разработке программного обеспечения использованы расчетные зависимости, принятые для гидравлических расчетов в проектной практике. **Результаты:** на конкретном примере показана усовершенствованная методика проведения универсального автоматизированного гидравлического расчета труб определенного диаметра, позволяющая получить полную картину значений гидравлических и энергетических характеристик изношенного водопровода по толщине слоя отложений, измеренной с помощью рентгеноскопии. **Практическая значимость:** разработано ПО, предназначенное для определения параметров водопроводных труб. Данное ПО учитывает варьирующуюся толщину внутренних отложений, что обеспечивает более точный прогноз периода их дальнейшей эксплуатации и своевременной замены. Описана усовершенствованная методика проведения гидравлического расчета изношенных металлических сетей с внутренними отложениями с использованием автоматизированного программного обеспечения «ГРИТ» — «Гидравлический расчет изношенных трубопроводов».

Ключевые слова: металлические сети водоснабжения, внутренние отложения, гидравлический расчет, программное обеспечение

Введение

Современные способы расчета гидравлических характеристик труб водопровода при определении гидравлического уклона основаны на применении известной формулы профессора Ф. А. Шевелева, имеющей вид [1]:

$$i_{p(\Phi)} = 0,00107 \frac{V_{p(\Phi)}^2}{(d_{вн}^{p(\Phi)})^{1,3}}, \quad (1)$$

где $i_{p(\Phi)}$ — расчетный (фактический) гидравлический уклон в новых трубах, мм/м;

$V_{p(\Phi)}^2$ — расчетная (фактическая) скорость движения воды в новых и изношенных трубах, м/с;

$d_{вн}^{p(\Phi)}$ — расчетный (фактический) внутренний диаметр в новых и изношенных трубах, м.

В таблицах для гидравлических расчетов, которые Ф. А. Шевелев создал, установлена

взаимосвязь для изношенных водопроводных труб при отложениях в 1 мм, что влияет на фактический внутренний диаметр труб менее чем на 1%. Поэтому автор этих таблиц для обозначения изношенных водопроводных труб использовал понятие «неновые» металлические трубы, полагая, что значение $d_{\text{вн}}^{\phi}$ при эксплуатации не будет отклоняться в диапазоне 1% [2].

На основании анализа фактических значений толщины отложений (δ_{ϕ}), выполненного авторами на изношенных стальных и чугунных сетях водоснабжения в различных регионах страны, были разработаны специальные таблицы для гидравлических расчетов металлических водопроводных сетей при δ_{ϕ} от 1 до 30 мм [3].

На рис. 1 показаны внутренние отложения δ_{ϕ} в изношенных трубах из стали и серого чугуна [4].

Условия задачи: при фактической толщине слоя отложений $\delta_{\phi} = 2,3$ мм сопоставить характеристики гидравлического потенциала при наружном диаметре трубы $d_n = 114$ мм и расходе воды $q = 18,0$ л/с (табл. 1).

Результаты сравнения значений характеристик гидравлического потенциала изношен-

ТАБЛИЦА 1. Сравнение значений характеристик труб по разным таблицам

По Таблицам [2]			По Таблицам [3]		
Характеристики гидравлического потенциала					
$d_{\text{вн}}^p$, мм	V_p , м/с	$1000 i_p$, мм/м	$d_{\text{вн}}^{\phi}$, мм	V_{ϕ} , м/с	$1000 i_{\phi}$, мм/м
99,0	2,12	91,10	95,4	2,30	101,99
Расхождение значений, %					
–	–	–	3,64	7,83	10,68

ных труб, полученных с использованием разных таблиц, демонстрируют, что применение методов, не учитывающих реальную величину слоя отложений $\delta_{\phi} > 1,0$ мм, увеличивает погрешность результатов. Погрешность увеличивается потому, что в таблицах не берется во внимание изменение δ_{ϕ} .

Общепринято, что на внутренних стенках труб в зависимости от физико-химических характеристик поверхностных и подземных источников водоснабжения в процессе эксплуатации ежегодно образуется слой отложений толщиной не менее $\delta_{\phi} = 0,3$ мм. То есть за 10 лет эксплуатации сети $\delta_{\phi} \approx 3,0$ мм [4, 5, 6].

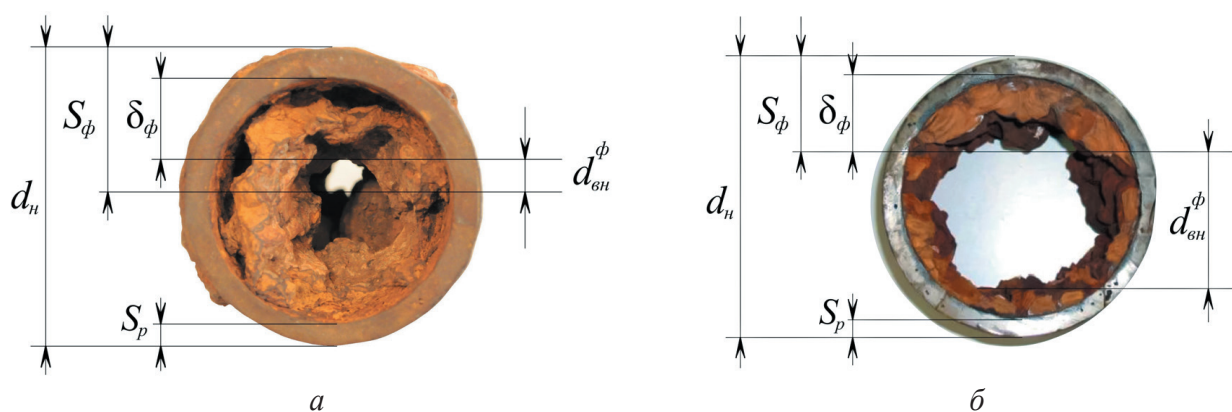


Рис. 1. Слой внутренних отложений δ_{ϕ} : *a* — в стальных трубах; *б* — в трубах из серого чугуна (d_n — наружный диаметр трубы, м; S_p — толщина стенки трубы, м; S_{ϕ} — толщина стенки трубы с отложениями, мм; δ — толщина слоя отложений, мм; $d_{\text{вн}}^{\phi}$ — внутренний диаметр труб с отложениями, мм)

Расчет коэффициента эффективности

а

Входные параметры

Наружный диаметр трубы (dн), мм:	325
Толщина стенки трубы (Sp), мм:	4.5
Толщина слоя отложения (δф), мм:	10
Длина трубопровода (L), м:	1000
Расход воды (q, л/с, м3/с):	120

Единицы измерения расхода: м³/с л/с

Расчитать все параметры

б

Результаты расчета

Внутренний диаметр (новая труба): **d_{рвн} = 316.0000 мм**
 Фактический внутренний диаметр (с отложениями): **d_{фвн} = 296.0000 мм**
 Коэффициент эффективности эксплуатации Кэф: **Кэф = 0.7071**

Детали расчета

Входные параметры:
 Наружный диаметр трубы: 325.0000 мм (0.325000 м)
 Толщина стенки: 4.5000 мм (0.004500 м)
 Толщина слоя отложения: 10.0000 мм (0.010000 м)
 Длина трубопровода: 1000.0 м
 Расход воды (q): 0.120000 м³/с

Расчетные параметры:
 Внутренний диаметр новой трубы: 316.0000 мм (0.316000 м)
 Фактический внутренний диаметр (с отложениями): 296.0000 мм (0.296000 м)
 Скорость в новой трубе (Vр): 1.5301 м/с
 Скорость в трубе с отложениями (Vф): 1.7438 м/с
 Гидравлический уклон новой трубы (ip): 0.011200 м/м (11.200 мм/м)
 Гидравлический уклон трубы с отложениями (iф): 0.015839 м/м (15.839 мм/м)
 Потери напора (новая труба): 11.76 м (с учетом коэффициента местных потерь 1.05)
 Потери напора (с отложениями): 16.63 м (с учетом коэффициента местных потерь 1.05)
 Энергопотребление (новая труба): 19.78 кВт
 Энергопотребление (с отложениями): 27.97 кВт
 Кэф = 0.7071

Рис. 2. Пример использования разработанного программного обеспечения «ГРИТ»:

а — входные параметры для расчета в программном обеспечении;

б — результаты расчета в программном обеспечении

Учитывая вышеизложенное, прогнозирование значений характеристик изношенных водопроводных сетей по коэффициенту эффективности их эксплуатации $K_{эф}$, становится актуальным [4, 7, 8].

Система «ГРИТ»

Определение фактической величины слоя отложений δ_f и расчет параметров гидравлического потенциала в старых водопроводных системах,

имеющих внутренние отложения, представляют собой сложную и трудозатратную задачу. Это обусловлено тем, что формирование структуры данного слоя зависит от множества факторов, включая свойства транспортируемой жидкости и условия эксплуатации трубопровода [9, 10].

Поэтому для повышения скорости и точности гидравлических расчетов на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» ПГУПС разработано универсальное

программное обеспечение «ГРИТ» на языке программирования Python [11], позволяющее:

- улучшить способ вычисления гидравлических характеристик изношенных труб с помощью использования в расчетах наиболее точного значения δ_{ϕ} ;
- увеличить точность расчетов значений характеристик гидравлического потенциала изношенных труб: $d_{\text{вн}}^{\phi}$, V_{ϕ} , i_{ϕ} ;
- ускорить расчет параметров характеристик труб;
- рассчитать энергопотребление насоса $N_{\text{дв}}^{\phi}$ и коэффициент эффективности $K_{\text{эф}}$.

Программа «ГРИТ» имеет два функциональных модуля.

Модуль 1. «Расчет $K_{\text{эф}}$ эксплуатации изношенного водопровода» по заданным значениям: q , S_p , δ_{ϕ} , L (рис. 1). Программа в автоматическом режиме производит сравнительный расчет значений характеристик гидравлического потенциала новых и оцениваемых (изношенных) труб.

На рис. 2 приведен конкретный пример использования разработанного программного обеспечения «ГРИТ».

Модуль 2. Расчет расхождений (сравнение) значений характеристик металлических труб.

Данные сравниваемого анализа новых и изношенных водопроводных труб являются обо-

снованием для принятия объективного (доказательного) решения для приведенного примера. Продолжение дальнейшей эксплуатации трубопровода со значениями характеристик, приведенными в табл. 2, недопустимо, так как [12]:

$$K_{\text{эф}}^{\phi} = 0,71 < K_{\text{эф}}^{\text{доп}} = 0,80. \quad (2)$$

Программа «ГРИТ» автоматически выполняет сравнительный анализ параметров гидравлического потенциала новых и изношенных водопроводных труб при любой толщине слоя отложений δ_{ϕ} . Оценка состояния труб проводится посредством расчета коэффициента фактической эффективности их эксплуатации $K_{\text{эф}}^{\phi}$ в сравнении с предельно допустимым значением коэффициента эффективности $K_{\text{доп}}^{\phi}$ [13]. На основании этого сравнения принимается решение о целесообразности дальнейшего использования трубопровода.

Данное программное обеспечение также позволяет за счет усовершенствования увеличить скорость и точность проведения гидравлического расчета изношенных металлических водопроводов для обоснования необходимости продолжения эксплуатации водопровода или его вывода для замены труб на новые, а также ускоряет для специалистов процесс разработки проектов реконструкции изношенных водопроводных сетей.

ТАБЛИЦА 2. Процент расхождения значений сравниваемых характеристик труб

Характеристики новых и изношенных труб диаметром $d_{\text{вн}}^p = 316$ мм										
Расход q , л/с	Новые трубы					Изношенная труба со слоем отложений $\delta_{\phi} = 2,6$ мм				
	$d_{\text{вн}}^p$, мм	V_p , м/с	i_p , мм/м	N , кВт/ч	$K_{\text{эф}}$	$d_{\text{вн}}^{\phi}$, мм	V_{ϕ} , м/с	i_{ϕ} , мм/м	N , кВт/ч	$K_{\text{эф}}$
120,0	316	1,53	0,01120	19,78	1	296,0	1,74	0,01584	27,97	0,71
	Расхождение, %									
	–	–	–	–	–	6,33	13,97	41,41	41,41	29,29

Список источников

1. Шевелев Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. М.: Госстройиздат, 1953. 208 с.
2. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справ. пособие. М.: Бастет, 2014. 384 с.
3. Продоус О.А., Якубчик П.П., Шлычков Д.И. Особенности гидравлического расчета водопроводов из металлических, полимерных и металлополимерных труб: терминологический словарь по наружным сетям водоснабжения и канализации. М.: Перо, 2023. 288 с.
4. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Коэффициент эффективности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения как фактор оценки возможности продолжения их дальнейшей эксплуатации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. Т. 25. №3. 2023. С. 162–168.
5. Новая зависимость для гидравлического расчета металлических водопроводов с внутренними отложениями / О.А. Продоус [и др.] // Приволжский научный журнал. 2024. №1 (69). С. 61–69.
6. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. Количественная оценка эффективности работы металлических сетей водоснабжения // Яковлевские чтения — 2023. Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения: сборник докладов участников XVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева (16–17 марта 2023 г.). М.: МИСИ — НИУ МГСУ, 2023. С. 64–70.
7. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. О повышении точности гидравлического расчета металлических водопроводов с внутренними отложениями // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2023»: материалы XIV Международной научно-практической конференции (г. Кисловодск, 18–21 апреля 2023 г.). Новочеркасск: Лик, 2023. С. 80–85.
8. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. О влиянии толщины слоя внутренних отложений в металлических водопроводах на величину фактических потерь напора в трубах // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2023»: материалы XIV Международной научно-практической конференции (г. Кисловодск, 18–21 апреля 2023 г.). Новочеркасск: Лик, 2023. С. 96–101.
9. Продоус О.А., Якубчик П.П., Шлычков Д.И. Определение предельно допустимой толщины слоя внутренних отложений на стенках металлических водопроводных труб // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. №1 (781). С. 80–88.
10. Новиков М.Г., Продоус О.А. Эффективные пути устранения микробиологической коррозии внутренней поверхности металлических трубопроводов при одновременном существенном снижении их электрохимической коррозии // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. №12 (120). С. 40–43.
11. Воинцева И.И., Новиков М.Г., Продоус О.А. Продление периода эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения из стальных и чугунных труб // Инженерные системы. АВОК — Северо-Запад. 2019. №1. С. 44–47.
12. Продоус О.А. Зависимость продолжительности использования металлических трубопроводов систем водоснабжения от толщины слоя отложений на внутренней поверхности труб // Сборник докладов XV Международной научно-технической конференции «Яковлевские чтения» (19 марта 2020 г.). М.: МИСИ — МГСУ, 2020. С. 113–117.
13. Гидравлический расчет изношенных труб водоснабжения: государственная программа для ЭВМ. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Номер регистрации RU 2025687420 / Балашов С.С., Продоус О.А., Якубчик П.П.

Дата поступления: 21.10.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

Контактная информация:

ПРОДОУС Олег Александрович —

канд. техн. наук, доцент;

pro@enco.su

ЯКУБЧИК Петр Петрович — канд. техн. наук,

профессор; p.jakub@mail.ru

БАЛАШОВ Сергей Сергеевич — аспирант;

6761034@gmail.com

Enhancement of hydraulic calculations for metallic water pipelines within the GRIT software**A. Prodous, P. P. Yakubchik, C. C. Balashov**

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

For citation: *Prodous O.A., Yakubchik P.P., Balashov C.C.* Enhancement of hydraulic calculations for metallic water pipelines within the GRIT software // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 139–145. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-139-145. (In Russian)**Abstract**

During long-term operation of metallic water supply networks, a deposit layer forms on the inner pipeline walls and progressively increases in thickness, which adversely affects the key performance parameters of the system. **Objective:** to improve the methodology for rapid automated estimation of the hydraulic potential characteristics of aging water pipelines with different values of their operational efficiency coefficient. To develop software to accelerate these computational procedures. **Research Methods:** the software was developed using computational relationships adopted in standard hydraulic design practice. **Results:** drawing on a particular case study, an improved methodology for the automated hydraulic analysis of pipes of a specified diameter has been introduced. This methodology provides a comprehensive profile of the hydraulic and energy characteristics of an aging water main, with the analysis linked directly to the thickness of internal scale and sediment layers identified through X-ray inspection. **Practical significance:** software has been developed to determine the operational parameters of water-supply pipelines. This software accounts for variations in the thickness of deposits formed on the pipe inner surface, enabling a more accurate prediction of remaining service life and supporting timely replacement planning. An updated method is proposed for hydraulic calculations of deteriorated metal pipeline networks with internal deposits using the automated GRIT software, whose name refers to the Hydraulic Calculation of Deteriorated Pipelines (Gidravlicheskiy Raschet Iznoshennykh Truboprovodov).

Keywords: metallic water supply networks, internal deposits, hydraulic calculation, software**References**

1. Shevelev F.A. Issledovanie osnovnykh gidravlicheskiy zakonomernostey turbulentnogo dvizheniya v trubah. M.: Gosstrojizdat, 1953. 208 s. (In Russian)

2. Shevelev F.A., Shevelev A.F. Tablicy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub: sprav. posobie. M.: Bastet, 2014. 384 s. (In Russian)

3. Prodous O.A., Yakubchik P.P., Shlychkov D.I. Osobennosti gidravlicheskogo rascheta vodoprovodov iz metallicheskiy, polimernykh i metallopolimernykh

trub: terminologicheskij slovar' po naruzhnym setyam vodosnabzheniya i kanalizacii. M.: Pero, 2023. 288 s. (In Russian)

4. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Koefficient effektivnosti ekspluatatsii setey vodosnabzheniya i vodootvedeniya kak faktor ocenki vozmozhnosti prodolzheniya ih dal'nejshej ekspluatatsii // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. T. 25. №3. 2023. S. 162–168. (In Russian)

5. Novaya zavisimost' dlya gidravlicheskogo rascheta metallicheskih vodoprovodov s vnutrennimi otlozheniyami / O.A. Prodous [i dr.] // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2024. №1 (69). S. 61–69. (In Russian)
6. Prodous O.A., Yakubchik P.P., Balashov S.S. Kolichestvennaya ocenka effektivnosti raboty metallicheskih setej vodosnabzheniya // Yakovlevskie chteniya — 2023. Sistemy vodosnabzheniya i vodotvedeniya. Sovremennye problemy i resheniya: sbornik dokladov uchastnikov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvyashchennoj pamyati akademika RAN S.V. Yakovleva (16–17 marta 2023 g.). M.: MISI — NIU MGSU, 2023. S. 64–70. (In Russian)
7. Prodous O.A., YAKubchik P.P., Balashov S.S. O povyshenii tochnosti gidravlicheskogo rascheta metallicheskih vodoprovodov s vnutrennimi otlozheniyami // Tekhnologii ochistki vody “TEKHNOVOD-2023”: materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (g. Kislovodsk, 18–21 aprelya 2023 g.). Novocherkassk: Lik, 2023. S. 80–85. (In Russian)
8. Prodous O.A. Yakubchik P.P. Balashov S.S. O vliyani tolshchiny sloya vnutrennih otlozhenij v metallicheskih vodoprovodah na velichinu fakticheskikh poter' napora v trubah // Tekhnologii ochistki vody “TEKHNOVOD-2023”: materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (g. Kislovodsk, 18–21 aprelya 2023 g.). Novocherkassk: Lik, 2023. S. 96–101. (In Russian)
9. Prodous O.A., Yakubchik P.P., Shlychkov D.I. Opredelenie predel'no dopustimoy tolshchiny sloya vnutrennih otlozhenij na stenkah metallicheskih vodoprovodnyh trub // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2024. №1 (781). S. 80–88. (In Russian)
10. Novikov M.G., Prodous O.A. Effektivnye puti ustraneniya mikrobiologicheskoy korrozii vnutrennej poverhnosti metallicheskih truboprovodov pri odnovremennom sushchestvennom snizhenii ih elektrohimicheskoy korrozii // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. 2017. №12 (120). S. 40–43. (In Russian)
11. Voinceva I.I., Novikov M.G., Prodous O.A. Prodlenie perioda ekspluatatsii truboprovodov sistem vodosnabzheniya iz stal'nyh i chugunnyh trub // Inzhenernye sistemy. AVOK — Severo-Zapad. 2019. №1. S. 44–47. (In Russian)
12. Prodous O.A. Zavisimost' prodolzhitel'nosti ispol'zovaniya metallicheskih truboprovodov sistem vodosnabzheniya ot tolshchiny sloya otlozhenij na vnutrennej poverhnosti trub // Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii “Yakovlevskie chteniya” (19 marta 2020 g.). M.: MISI — MGSU, 2020. S. 113–117. (In Russian)
13. Gidravlicheskij raschet iznoshennyh trub vodosnabzheniya: gosudarstvennaya programma dlya EVM. Federal'naya sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti. Nomer registratsii RU 2025687420 / Balashov S.S., Prodous O.A., Yakubchik P.P. (In Russian)

Received: 21.10.2025

Accepted: 19.01.2026

Author's information:

Oleg A. PRODOUS — PhD in Engineering, Associate Professor; p.jakub@mail.ru

Peter P. YAKUBCHIK — PhD in Engineering, Professor; pro@enco.su

Sergei S. BALASHOV — Postgraduate Student; 6761034@gmail.com

УДК 624.131.532

Механизмы формирования бокового давления грунта в соответствии с упрощенной дискретной моделью песка

К. В. Сливец, П. А. Кравченко

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

Для цитирования: Сливец К. В., Кравченко П. А. Механизмы формирования бокового давления грунта в соответствии с упрощенной дискретной моделью песка // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 146–153. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-146-153

Аннотация

Цель: рассмотрение механизмов формирования коэффициента бокового давления грунта в состоянии покоя K_0 на уровне его элементарной структуры — микроструктуры грунта. Его базовыми элементами являются частицы твердой фазы. Объектом исследования являлась дискретная среда — чистый кварцевый песок средней крупности. **Методы:** в качестве модели рассмотрена монодисперсная среда с периодической укладкой зерен — дискретная среда с одинаковым размером, формой частиц и регулярной их укладкой. Очевидно, что такого рода среда является значительным упрощением, так как реальный грунт — это набор зерен различных размеров, которые могут отличаться на несколько порядков. Моделирование с учетом реального распределения частиц по крупности существенно усложняет процесс исследования. Только в условиях монодисперсной среды становится возможным однозначно определять предельные плотности сложения и получать аналитические выражения для коэффициента бокового давления. Обобщены имеющиеся теоретические решения, применяемые при определении коэффициента бокового давления для сред такого рода. При численном моделировании для описания зернистых сред использован инструментарий механики дискретных сред, в котором элементарный объем грунта рассматривается как механизм, состоящий из некоторого количества взаимодействующих зерен и подчиняющийся основным постулатам динамики. Произведено численное моделирование среды в условиях формирования K_0 с использованием метода дискретных элементов. **Результаты:** показано, что теоретические зависимости действительны только до определенных значений пористости и плотности сложения. При пористости, близкой к предельной, наблюдается резкий рост коэффициента бокового давления в сравнении с теоретическими результатами. Сравнение с лабораторными экспериментами по определению K_0 показывает существенное отличие. Так, рассматриваемая упрощенная модель прогнозирует большее значение K_0 для рыхлого песка в сравнении с более плотной его укладкой. В лабораторных экспериментах наблюдалась обратная зависимость. **Практическая значимость:** результаты работы имеют теоретическое значение для механики грунтов, так как процессы формирования коэффициента бокового давления рассматриваются с точки зрения механики дискретных сред. Подобный подход позволяет рассмотреть грунтовый объем как механизм и детально проследить вклад каждой из его характеристик в рассматриваемый процесс.

Ключевые слова: зернистые среды, песок, коэффициент, трение, микроструктура песка, моделирование

Определение коэффициента бокового давления грунта в состоянии покоя K_0 (далее — коэффициент бокового давления) имеет важное

теоретическое и практическое значение. Выражение для коэффициента бокового давления можно получить на основании деформационных

характеристик среды. Широко известно выражение, получаемое в рамках теории упругости, при котором величина K_0 постоянна. При использовании более сложных моделей зависимость для K_0 может носить нелинейный характер и зависеть от уровня действующих напряжений.

Следует отметить, что эти выражения в итоге носят феноменологический характер, так как деформационные характеристики моделей выбираются таким образом, чтобы максимально приблизиться к результатам лабораторных испытаний. Эти характеристики, в свою очередь, однозначно определяют значение коэффициента бокового давления.

Иным по отношению к механике сплошных сред является подход, когда элементарный объем грунта рассматривается как набор взаимодействующих частиц (зерен). В этом случае для описания используется инструментарий механики дискретных сред, в котором элементарный объем грунта рассматривается как механизм, состоящий из некоторого количества взаимодействующих зерен и подчиняющийся основным постулатам динамики.

Наиболее распространенным методом решения подобных задач является метод дискретных элементов — численный метод, исходящий из рассмотрения упрощенной формы частиц (зерен) дискретной среды: в виде шаров для пространственной постановки задачи и дисков — для двумерной. С его помощью возможно моделировать грунт, точнее некоторый его малый объем. Задавая надлежащую схему нагружения, можно добиться условий, соответствующих ситуации, которую описывает коэффициент давления грунта в состоянии покоя.

Реальный грунт — это набор зерен различных размеров, которые могут отличаться на несколько порядков. Моделирование с учетом

соотношения фракций по крупности сложно и ведет к непропорциональному росту трудоемкости. Поэтому при постановке задачи следует идти по пути максимального упрощения. Этим обусловлено рассмотрение в данной статье монодисперсной среды — среды с одинаковым размером, формой частиц и их периодической укладки. Очевидно, что в этом случае рассматриваемая упрощенная модель будет отражать свойства только узкой разновидности грунтов — однородных песков. Также очевидно, что предположение о периодической укладке частиц является значительным упрощением, однако в такой постановке становится возможным однозначно определять плотность сложения среды и получать аналитические выражения для коэффициента бокового давления. Таким образом, для рассмотрения механизма формирования коэффициента бокового давления использовалась упрощенная расчетная схема дискретной среды: двумерная, монодисперсная среда с периодической укладкой частиц (дисков) правильной круглой формы.

Можно показать, что для такой среды наиболее плотной будет являться гексагональная укладка, а наименее плотной — диагональная кубическая [1]. Плотность укладки может быть охарактеризована величинами \tilde{n} , \tilde{m} , $\tilde{\epsilon}_{\min}$ и $\tilde{\epsilon}_{\max}$ — пористостью, объемной долей твердой фазы и коэффициентами пористости в максимально возможном плотном и рыхлом состояниях соответственно. Волна над символом пористости и других величин означает, что они относятся к двумерной задаче.

Введем характерный угол 2θ , который будет меняться при переходе от наиболее плотного состояния к наиболее рыхлому. Для гексагональной укладки $2\theta = 60^\circ$ (рис. 1а), а для диагональной кубической $2\theta = 90^\circ$ (рис. 1б), то есть с увеличением угла уменьшается плотность сложения частиц.

Свяжем плотность укладки с углом θ . Для гексагональной упаковки $\tilde{m} = \pi/(2\sqrt{3}) \approx 0,9096$ и соответствующая ей пористость $\tilde{n} = 1 - \tilde{m} = 1 - 0,9096 \approx 0,090$. Также для нее обозначим коэффициент пористости как \tilde{e}_{\min} , ведь такое состояние является наиболее плотным из возможных. Величина \tilde{e}_{\min} составит 0,0994.

В наиболее рыхлой — квадратной диагональной упаковке: $\tilde{m} = \pi/4 \approx 0,7854$, пористость $\tilde{n} = 1 - \tilde{m} = 1 - 0,7854 \approx 0,215$, соответствующий коэффициент пористости \tilde{e}_{\max} составит 0,2726.

Выразим изменение пористости как функцию от 2θ . Для этого рассмотрим частицы с центром в точках А, В, С и D и радиусом r (рис. 2).

Для частиц с центром в точках А и С площадь сектора S_1 , ограниченного сторонами ромба, может быть найдена на основании зависимости (1). Аналогично может быть найдена площадь сектора S_2 и для частиц с центром в точках В и D на основании зависимости (2).

$$S_1 = \frac{2\beta\pi r^2}{360^\circ}, \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{(180^\circ - 2\beta)\pi r^2}{360^\circ}, \quad (2)$$

$$S_{ABCD} = 4r^2 \sin 2\theta. \quad (3)$$

Согласно уравнениям (1–3), объемная доля частиц в ячейке (ромб ABCD) может быть записана в виде:

$$\tilde{m} = (2S_1 + 2S_2)/S_{ABCD} = \pi/4\sin 2\theta, \quad (4)$$

откуда угол θ равен:

$$\theta = \frac{\arcsin \frac{\pi}{4\tilde{m}}}{2}. \quad (5)$$

Далее возможно рассмотреть простейшую систему, состоящую из 3 частиц (рис. 3).

Если выполнить осреднение усилий в контактах по некоторой площади (объему), то воз-

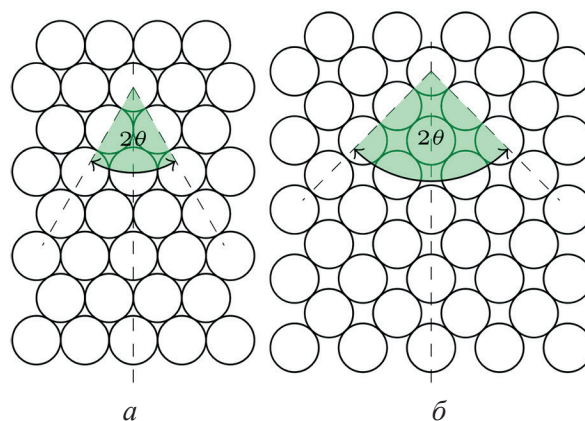


Рис. 1. Схема укладки дисков: а — если угол равен 60° ; б — если угол равен 90°

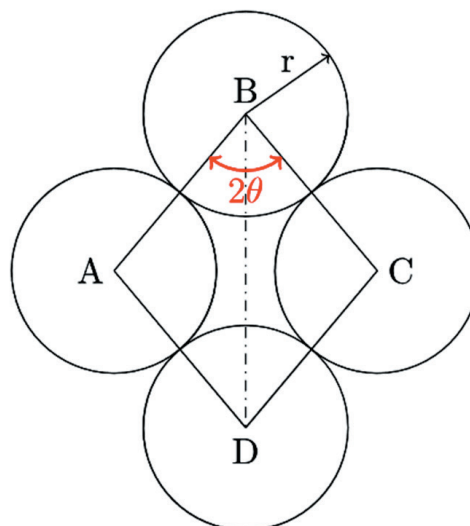


Рис. 2. Фрагмент среды с периодической укладкой

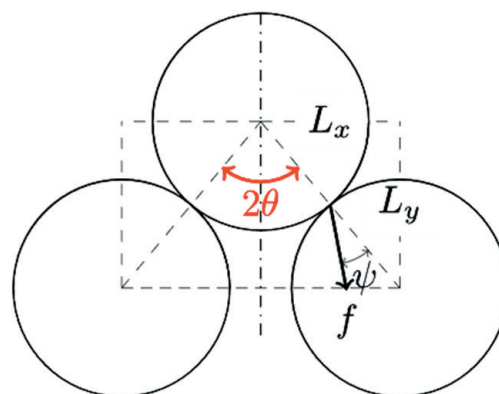


Рис. 3. Схема взаимодействия частиц

можно перейти к напряжениям. Для этой цели чаще всего используют формулу Лява [2]:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum f_i \cdot L_j, \quad (6)$$

где f_i — компоненты вектора силы в контакте, L_i — компоненты вектора, соединяющего центры контактирующих частиц. В нашем случае $\sigma_{11} = \sigma_x$ и $\sigma_{22} = \sigma_y$:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{f_0 \sin(\theta - \psi) 2r \sin \theta}{f_0 \cos(\theta - \psi) \cdot 2r \cos \theta} = \tan(\theta - \psi) \cdot \tan \theta. \quad (7)$$

Следующее выражение может быть получено путем подстановки уравнения (5) в уравнение (7):

$$K_0 = \tan \left(\frac{\arcsin \frac{\pi}{4\tilde{m}} - \psi}{2} \right) \cdot \tan \frac{\arcsin \frac{\pi}{4\tilde{m}}}{2}, \quad (8)$$

где ψ — угол трения материала частиц.

Полученные теоретические зависимости, очевидно, нуждаются в подтверждении моделированием. Несмотря на простоту модели монодисперсной среды, постановка натурального эксперимента достаточно сложна. Метод

дискретных элементов (МДЭ) [3, 4] позволяет произвести численное моделирование, существенно сократив затрачиваемые ресурсы. Численный эксперимент реализовывался в программном комплексе PFC 2D (Itasca). Моделирование проводилось для частиц диаметром 0,25 мм, что соответствует песку средней крупности [9].

Характеристики жесткости контактов в модели назначались на основании решения задачи контактного взаимодействия частиц соответствующего материала формы и размеров [4, 5, 9]. В качестве материала частиц был рассмотрен чистый кварц. Было получено следующее соотношение жесткостей контактов в нормальном K_n - и тангенциальном K_t -направлениях: $K_n / K_t = 1,04$. Коэффициент трения материала частиц $\mu = \tan \psi$, то есть кварца, составляет порядка 0,5 [6]. Для установления характера влияния данного параметра при проведении моделирования $\tan \psi$ варьировался в диапазоне 0,15–0,45.

В рамках численного моделирования были рассмотрены схемы с углом 2θ от 60° до 85° (рис. 4а, б). Формирование схемы с требуемым углом осуществлялось пошагово.

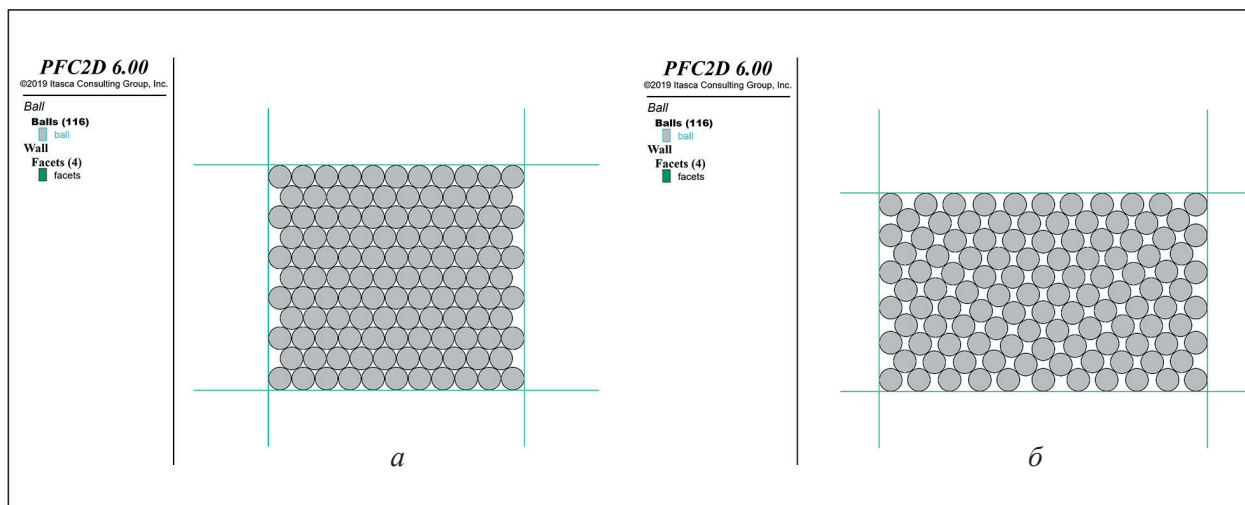


Рис. 4. Расчетные схемы, используемые при численном моделировании: а — $2\theta = 60^\circ$; б — $2\theta = 85^\circ$

Сначала создавалась гексагональная укладка частиц, затем боковые стенки медленно раздвигались, а на верхней границе поддерживалось небольшое усилие, необходимое для расклинивания частиц и увеличения угла 2θ . Данный алгоритм позволяет получить достаточно однородную с точки зрения геометрии и напряженно-деформированного состояния схему. Максимальный угол, для которого удалось подготовить расчетную схему, составил 85° . Добиться большего угла оказалось невозможно: формируемый массив частиц терял устойчивость. После формирования расчетной схемы осуществлялось нагружение образца по верхней и нижней границам при отсутствии перемещений по боковым границам, что соответствует периодическим граничным условиям. Целевая величина нагрузки, при которой определялось значение, составляла 200 кПа. После ее достижения на основе встроенного алгоритма осреднения, использующего зависимость Лява и иные алгоритмы [8, 10], вычислялись горизонтальное $\sigma_{11} = \sigma_x$ и вертикальное $\sigma_{22} = \sigma_y$ напряжение и коэффициент K_0 .

Ниже приведены графики зависимости коэффициента бокового давления от 2θ при различных $\tan\psi$. Из рисунка видно, что в целом результаты численного моделирования хорошо совпадают с прогнозом по формуле (8). Однако при величине угла более 78° наблюдается нарастающее расхождение между теорией и поставленным экспериментом. В этом диапазоне наблюдается резкий рост коэффициента бокового давления. Следует отметить, что углу $2\theta = 78^\circ$ соответствует пористость $\tilde{n} = 0,195$. По результатам моделирования произвольной укладки монодисперсной среды установлено, что эта величина является предельной, при которой в формируемой системе не возникают значительные начальные напряжения. Таким образом, для хаотической укладки монодис-

персной среды безраспорной является укладка с высокой пористостью. В то же время, как показало численное моделирование, при высоких значениях пористости механизм формирования бокового давления резко отличается от теоретического, что требуется учитывать при построении моделей грунтов (рис. 5).

По результатам моделирования отмечена однозначная зависимость коэффициента бокового давления от плотности его сложения.

Интересно проследить, насколько данная зависимость коррелирует с результатами натурного моделирования. Для песков ввиду их хаотического сложения угол, аналогичный углу 2θ , ввести не представляется возможным. Теоретически наиболее обосновано использование такой относительной величины, как степени плотности сложения:

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}, \quad (9)$$

где e_{min} , e_{max} и e — коэффициенты пористости песка в максимально возможном плотном,

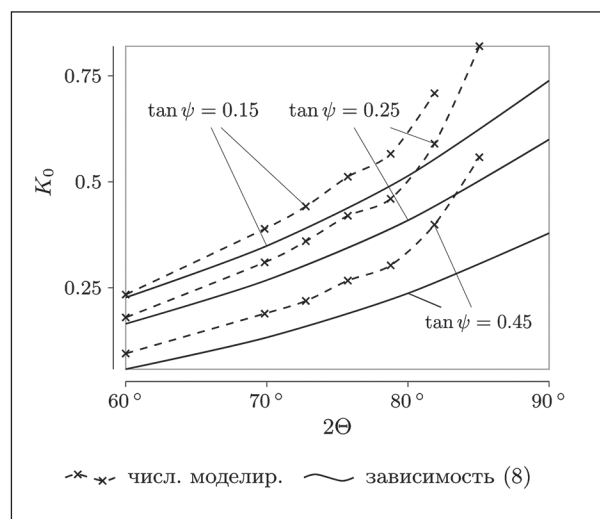


Рис. 5. Коэффициент бокового давления по результатам численного моделирования и на основании аналитического решения

рыхлом и естественном состояниях соответственно.

В работе [11] приведены результаты моделирования K_0 для песков средней крупности на центрифуге. Различными способами отсыпки моделировалась различная плотность, описываемая эмпирической зависимостью:

$$K_0 = 0,129 I_D + 0,331. \quad (10)$$

Сравнение с лабораторными экспериментами по определению K_0 показывает существенное отличие (рис. 6). Так, рассматриваемая упрощенная модель (зависимость (8)) прогнозирует большее значение K_0 для рыхлого, чем для плотного. Величина трения между частицами в зависимости (8) принята равной как для кварца — минеральной частицы песка $\tan \psi = 0,45$ [7].

Выполненное сравнение показывает, что механизмы формирования бокового давления в реальном грунте существенно отличаются от модели, основанной на представлении грунта как монодисперсной среды с периодической укладкой частиц.

Список источников

1. Слоэн Н. Дж. А. Упаковка шаров // В мире науки. 1984. № 3. С. 72–82.
2. Love A. E. H. A Treatise of Mathematical Theory of Elasticity. Cambridge: University Press, 1927.
3. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. 1979. No. 29 (1). Pp. 47–65.
4. Kruyt N. P. Statics and Kinematics of Discrete Cosserat-type Granular Materials // International Journal of Solids and Structures. 2003. No. 40 (3). Pp. 511–534.
5. Дидух Б. И. Уругопластическое деформирование грунтов. М.: Изд-во Ун-та дружбы народов, 1987. 166 с.
6. Mindlin R. D., Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces // Journal of Applied Mechanics. 1953. No. 20 (3). Pp. 327–344.
7. Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса / Г. Г. Кочарян [и др.] // Физика Земли. 2023. № 3. С. 3–32. DOI: 10.31857/S0002333723030067.

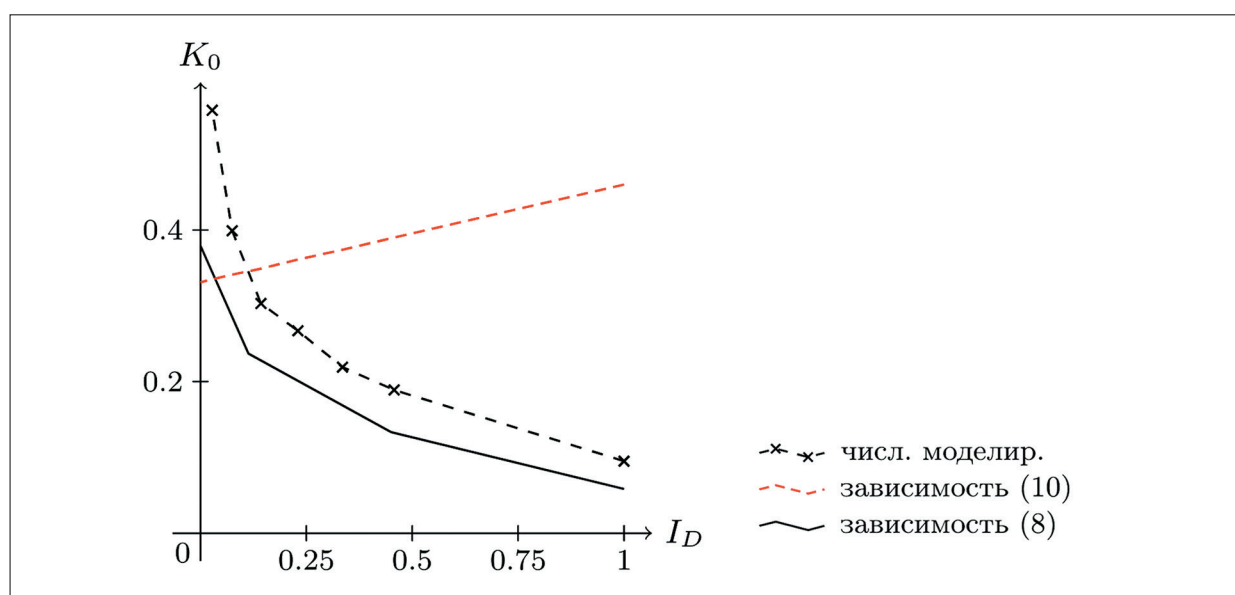


Рис. 6. Сравнение величин коэффициента бокового давления

8. Kruyt N.P., Rothenburg, L. Micromechanical Definition of the Strain Tensor for Granular Materials // Journal of Applied Mechanics (Transactions of the ASME). 1996. No. 63 (3). Pp. 706–711.
9. Li X., Li X. S. Micro-Macro Quantification of the Internal Structure of Granular Materials // J. Eng. Mech. 2009. No. 135. Pp. 641–656.
10. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
11. Experimental Study on the Coefficient of Earth Pressure at Rest for Sand / L. Li [et al.] // Buildings. 2023. No. 13. 1276 p. DOI: 10.3390/buildings13051276.
12. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. М.: Высш. шк., 1991. 447 с.
- Дата поступления: 24.12.2025
Решение о публикации: 04.02.2026

Контактная информация:

СЛИВЕЦ Константин Владимирович — канд. техн. наук, доцент; soiltech@yandex.ru

КРАВЧЕНКО Павел Александрович — канд. техн. наук, доцент; pasha.sky@gmail.com

Mechanisms for generating lateral earth pressure at rest based on a simplified discrete sand model

K. V. Slivetz, P. A. Kravchenko

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

For citation: *Slivetz K. V., Kravchenko P. A. Mechanisms for generating lateral earth pressure at rest based on a simplified discrete sand model // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 146–153. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-146-153. (In Russian)*

Abstract

Objective: to investigate the mechanisms governing the coefficient of earth pressure at rest, K_0 , at the level of soil elementary structure, i.e., its microstructure. The fundamental components of soil microstructure are solid-phase particles. The study focused on a discrete medium represented by clean medium-sized quartz sand. **Methods:** this paper considers an idealized monodisperse medium with periodic grain packing, i.e., a discrete medium composed of particles identical in size and shape and arranged in a regular pattern. Apparently, this type of medium is a major simplification, as natural soils consist of grains of varied sizes, which may differ by several orders of magnitude. Modelling that accounts for the actual particle-size distribution significantly complicates the research process. At the same time, only monodisperse granular assemblies allow the limiting states of packing densities to be identified without ambiguity and make it possible to derive analytical expressions for the coefficient of lateral earth pressure. For this reason, this study reviews and summarizes available theoretical approaches developed for evaluating this coefficient in media of that type. In the numerical simulations, the granular media was described within the framework of discrete media mechanics. Under this approach, an elementary soil volume is treated as a mechanical system composed of a finite number of interacting grains, governed by the fundamental laws of dynamics. Numerical modelling of the medium during the formation of K_0 was simulated using the discrete element method. **Results:** the results indicate that the available theoretical relationships remain valid only within a limited range of porosity and packing density. When porosity approaches its limiting value, the coefficient of lateral earth pressure rises sharply relative to the values of the theoretical predictions. A comparison with laboratory measurements of K_0 reveals a substantial discrepancy between the simplified model and experimental evidence. In particular, the model suggests that loose sand should exhibit a greater K_0 than densely packed sand, whereas laboratory experiments demonstrate the reverse relationship. **Practical**

significance: the results of this study have theoretical significance for soil mechanics. By interpreting the development of the lateral earth pressure coefficient through the principles of discrete media mechanics the study makes it possible to examine, in detail, how each characteristic of the granular system contributes to the emergence of K_0 .

Keywords: granular media, sand, coefficient, friction, sand microstructure, modelling

References

1. Sloen N. Dzh. A. Upakovka sharov // *V mire nauki*. 1984. No. 3. S. 72–82. (In Russian)
2. Love A. E. H. *A Treatise of Mathematical Theory of Elasticity*. Cambridge: University Press, 1927.
3. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. 1979. No. 29 (1). Pp. 47–65.
4. Kruyt N. P. Statics and Kinematics of Discrete Cosserat-type Granular Materials // *International Journal of Solids and Structures*. 2003. No. 40 (3). Pp. 511–534.
5. Didukh B. I. *Uprugoplasticheskoe deformirovanie gruntov*. M.: Izd-vo Un-ta druzhby narodov, 1987. 166 s. (In Russian)
6. Mindlin R. D., Deresiewicz H. Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces // *Journal of Applied Mechanics*. 1953. No. 20 (3). Pp. 327–344.
7. Trenie kak faktor, opredelyayushchij izluchatel'nyuyu effektivnost' podvizhek po razlomam i vozmozhnost' ikh initsirovaniya. Sostoyanie voprosa / G. G. Kocharyan [i dr.] // *Fizika Zemli*. 2023. No. 3. S. 3–32. DOI: 10.31857/S0002333723030067. (In Russian)
8. Kruyt N. P., Rothenburg, L. Micromechanical Definition of the Strain Tensor for Granular Materials // *Journal of Applied Mechanics (Transactions of the ASME)*. 1996. No. 63 (3). Pp. 706–711.
9. Li X., Li X. S. Micro-Macro Quantification of the Internal Structure of Granular Materials // *J. Eng. Mech.* 2009. No. 135. Pp. 641–656.
10. GOST 25100-2020. Grunty. Klassifikatsiya. (In Russian)
11. Experimental Study on the Coefficient of Earth Pressure at Rest for Sand / L. Li [et al.] // *Buildings*. 2023. No. 13. 1276 p. DOI: 10.3390/buildings13051276.
12. Ivanov P. L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij*. M.: Vyssh. shk., 1991. 447 s. (In Russian)

Received: 24.12.2025

Accepted: 04.02.2026

Author's information:

Konstantine V. SLIVETZ — PhD in Engineering, Associate Professor; soiltech@yandex.ru

Pavel A. KRAVCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; pasha.sky@gmail.com

УДК 539.3

Изгиб полубесконечной прямоугольной пластины: полиномиальное решение

Д. П. Голоскоков¹, А. В. Матросов²

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

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

Для цитирования: Голоскоков Д. П., Матросов А. В. Изгиб полубесконечной прямоугольной пластины: полиномиальное решение // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 154–162. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-154-162

Аннотация

Цель: исследовать напряженно-деформированное состояние тонкой однородной изотропной полубесконечной прямоугольной пластины, защемленной по двум параллельным кромкам и как угодно закрепленной или свободной на третьей кромке. Показать возможность использования полученного решения для полубесконечной пластины при исследовании напряженно-деформированного состояния прямоугольных пластин конечных размеров. **Методы:** для решения поставленной задачи используется метод Л. В. Канторовича с базисными функциями, построенными на основе полиномов Якоби и удовлетворяющими граничным условиям на параллельных кромках полубесконечной пластины. Указанные базисные функции обладают свойством квазиортогональности своих первых и вторых производных, что приводит к расщеплению системы обыкновенных дифференциальных уравнений метода Л. В. Канторовича на отдельные обыкновенные дифференциальные уравнения, которые легко решаются аналитически. **Результаты:** получено приближенное аналитическое решение задачи изгиба полубесконечной прямоугольной пластины для различных случаев закрепления пластины. Показано, что полученное решение быстро сходится как для прогиба, так и для изгибающих моментов. Продемонстрирована эффективность использования решения задачи изгиба полубесконечной пластины для исследования напряженно-деформированного состояния прямоугольных пластин конечных размеров. Для этого построены решения задачи изгиба прямоугольных пластин конечных размеров при разных случаях закрепления. Использовались решение Бубнова — Галеркина для защемленной по контуру пластины и решение М. Леви для пластины, защемленной по двум параллельным кромкам и шарнирно опертой по двум другим кромкам. **Практическая значимость:** получено решение задачи изгиба полубесконечной пластины при разных граничных условиях. Данное решение может использоваться при расчете прямоугольных пластин конечных размеров.

Ключевые слова: полубесконечная прямоугольная пластина, изгиб пластины, метод Л. В. Канторовича, метод Бубнова — Галеркина, решение М. Леви, полиномы Якоби

Введение

В работе [1] отмечается, что решением более простой задачи изгиба полубесконечной пластины можно воспользоваться для расчета пластины конечных размеров. Этим определяется актуальность исследования изгиба полубесконечной пластины.

В монографии С. П. Тимошенко [1] приведены примеры решений задач об изгибе прямоугольной полубесконечной пластины при разных граничных условиях. В случае пластины, защемленной по двум противоположным краям со свободно опертой третьей стороной, получено выражение для прогиба

в виде интеграла с бесконечным пределом интегрирования.

В работе [2] приводится решение задачи об изгибе защемленной полубесконечной прямоугольной пластины, нагруженной равномерно распределенным давлением.

Впервые решение задачи об изгибе защемленной полубесконечной пластины было получено методом Л. В. Канторовича в работе [3]. В этой статье приводятся результаты статьи [2] как частный случай.

Постановка задачи и метод ее решения

Ограничимся рассмотрением полубесконечной изотропной пластины. Уравнение изгиба такой пластины, нагруженной произвольной поперечной нагрузкой $q(\xi, \eta)$, ($0 \leq \xi < \infty$, $-b \leq \eta \leq b$) имеет вид:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4} = \frac{b^4 q(\xi, \eta)}{D},$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость

пластины; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $w(\xi, \eta)$ — функция нормального прогиба, h — толщина пластины.

Введем безразмерные координаты $x = \xi / b$, $y = \eta / b$, $y|_{\eta=\pm b} = \pm 1$, $x|_{\xi=0} = 0$ так, что $x \geq 0$, $-1 \leq y \leq 1$.

Введем безразмерный прогиб $W = Dw/b^4 q_0$, где q_0 — характерный размер поперечной нагрузки. Тогда уравнение изгиба принимает вид:

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{q(x, y)}{q_0}. \quad (1)$$

Изгибающие моменты:

$$m_x = \frac{M_x}{b^2 q_0} = - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right),$$

$$m_y = \frac{M_y}{b^2 q_0} = - \left(\nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right).$$

Крутящий момент:

$$m_{xy} = \frac{M_{xy}}{b^2 q_0} = -(1-\nu) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}.$$

Перерезывающие силы:

$$N_x = \frac{V_x}{b q_0} = - \left(\frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 W}{\partial x \partial y^2} \right),$$

$$N_y = \frac{V_y}{b q_0} = - \left(\frac{\partial^3 W}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial y} \right),$$

$$S_x = \frac{Q_x}{b q_0} = - \left(\frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 W}{\partial x \partial y^2} \right),$$

$$S_y = \frac{Q_y}{b q_0} = - \left(\frac{\partial^3 W}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial y} \right).$$

Будем искать решение задачи в форме ряда:

$$W = \sum_{k=0}^{\infty} g_k(x) h_k(y), \quad (2)$$

где $h_k(y)$ — полиномы, удовлетворяющие однородным граничным условиям:

$$h_k(\pm 1) = h_k'(\pm 1) = 0; \quad (3)$$

$g_k(x)$ — неизвестные функции, которые определяются из системы обыкновенных дифференциальных уравнений метода Л. В. Канторовича.

Используя метод Бубнова — Галеркина [4], получим бесконечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений для определения функций $g_k(x)$:

$$\sum_{i=0}^{\infty} \left[\delta_{is} \frac{d^4 g_i}{dx^4} + 2a_{is} \frac{d^2 g_i}{dx^2} + b_{is} g_i \right] = q_s(x), \quad s = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4)$$

Здесь

$$\delta_{is} = \begin{cases} 1, & i = s, \\ 0, & i \neq s, \end{cases} \quad a_{is} = \int_{-1}^{+1} \frac{d^2 h_i(y)}{dy^2} h_s(y) dy, \quad b_{is} =$$

$$= \int_{-1}^{+1} \frac{d^4 h_i(y)}{dy^4} h_s(y) dy, \quad (5)$$

$$q_s(x) = \frac{1}{q_0} \int_{-1}^1 q(x, y) h_s(y) dy.$$

Систему дифференциальных уравнений (4) можно упростить, если принять предположение об ортогональности первых и вторых производных полиномов $h_k(y)$, то есть:

$$a_{ks} = \begin{cases} a_{kk}, & k = s, \\ 0, & k \neq s, \end{cases} \quad b_{ks} = \begin{cases} b_{kk}, & k = s, \\ 0, & k \neq s. \end{cases}$$

Тогда получаем вместо (4):

$$\frac{d^4 g_k(x)}{dx^4} + 2a_{kk} \frac{d^2 g_k(x)}{dx^2} + b_{kk} g_k(x) = q_k(x), \quad k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (6)$$

В качестве полиномов $h_k(y)$ выбираем полиномы

$$h_k(y) = \left\{ \frac{(2k+9)\Gamma(k+1)\Gamma(k+9)}{2^9\Gamma(k+5)\Gamma(k+5)} \right\}^{\frac{1}{2}} P_k^{(4,4)}(x),$$

ортонормированные на отрезке $[-1, 1]$:

$$\int_{-1}^1 h_m(y) h_n(y) dy = \delta_{m,n}.$$

Эти полиномы удовлетворяют условиям (3) и построены на основе полиномов Якоби [5, 6, 7, 8, 9].

Здесь

$$P_n^{(\alpha,\beta)}(x) = N_n^{(\alpha,\beta)} J_n^{(\alpha,\beta)}(x),$$

$$N_n^{(\alpha,\beta)} = \left\{ \frac{(2n+\alpha+\beta+1)\Gamma(n+1)\Gamma(n+\alpha+\beta+1)}{2^{\alpha+\beta+1}\Gamma(n+\alpha+1)\Gamma(n+\beta+1)} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$J_n^{(\alpha,\beta)}(x) = \frac{(-1)^n}{2n!} (1-x)^{-\alpha} (1+x)^{-\beta} \frac{d^n}{dx^n} \cdot \left[(1-x)^{\alpha+n} (1+x)^{\beta+n} \right],$$

$\Gamma(z)$ — гамма-функция (эйлеров интеграл 2-го рода). Полиномы $P_n^{(\alpha,\beta)}(x)$ нормированы с весом $\rho(x) = (1-x)^\alpha (1+x)^\beta$, ($\alpha > -1$, $\beta > -1$). Общее решение уравнения (6) запишем в виде:

$$g_k(x) = e^{-\alpha_k x} (C_{1k} \cos \beta_k x + C_{2k} \sin \beta_k x) + e^{\alpha_k x} (C_{3k} \cos \beta_k x + C_{4k} \sin \beta_k x) + \Phi_k(x); \quad (7)$$

где $\Phi_k(x)$ — частное решение неоднородного уравнения (6), $\gamma_k = \alpha_k \pm i\beta_k$ — корни характеристического уравнения:

$$\gamma_k^4 + 2a_{kk}\gamma_k^2 + b_{kk} = 0.$$

Приведем несколько первых корней:

k	α_k	β_k
0	2,075148920	1,142909900
1	3,655963124	1,538202315
2	5,258542818	2,062103917
3	6,942082397	2,681885160
4	8,728814208	3,404731632
5	10,62722672	4,235321441
6	12,64040430	5,174922315
7	14,76902179	6,222861461

Пусть край $x = 0$ полубесконечной пластины зашпелен. Граничные условия на этой кромке принимают вид:

$$g_k(0) = g_k'(0) = 0. \quad (8)$$

В силу ограниченности решения $W(x,y)$ при $x \rightarrow \infty$ решение (7) представим в виде:

$$g_k(x) = e^{-\alpha_k x} (C_{1k} \cos \beta_k x + C_{2k} \sin \beta_k x) + \Phi_k(x). \quad (9)$$

Используя решение (9), построим новые линейно независимые функции:

$$g_{0k}(x) = e^{-\alpha_k x} \left(\cos \beta_k x + \frac{\alpha_k}{\beta_k} \sin \beta_k x \right);$$

$$\varphi_{0k}(x) = e^{-\alpha_k x} \frac{1}{\beta_k} \sin \beta_k x.$$

Таким образом, вместо решения (9) можно также воспользоваться решением:

$$g_k(x) = C_{1k} g_{0k}(x) + C_{2k} \varphi_{0k}(x) + \Phi_k(x). \quad (10)$$

Определив постоянные интегрирования C_{1k} и C_{2k} в соответствии с условиями (8) и учитывая равенства:

$$g_{0k}(0) = 1, g'_{0k}(0) = 0, \varphi_{0k}(0) = 0, \varphi'_{0k}(0) = 1,$$

получим:

$$g_k(x) = -\Phi_k(0) g_{0k}(x) - \Phi'_k(0) \varphi_{0k}(x) + \Phi_k(x). \quad (11)$$

С учетом формул (2) и (11) получаем выражение для прогиба защемленной полубесконечной пластины:

$$W = \sum_{k=0}^{\infty} h_k(y) \left[\Phi_k(x) - \Phi_k(0) g_{0k}(x) - \Phi'_k(0) \varphi_{0k}(x) \right]. \quad (12)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи внешней нагрузки.

Пусть нагрузка $q(x,y) = q_0 = \text{const}$. Тогда в соответствии с формулами (5) и (12):

$$q_k(x) = h_k^*, h_k^* = \int_{-1}^1 h_k(y) dy; \quad (13)$$

$$\Phi_k(x) = \frac{h_k^*}{b_{kk}}; \quad (13)$$

$$\Phi'_k(x) = 0; \quad (14)$$

$$W = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h_k^*}{b_{kk}} h_k(y) [1 - g_{0k}(x)]. \quad (15)$$

Для изгибающего момента:

$$m_x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h_k^*}{b_{kk}} \left\{ h_k(y) g_k''(x) - v h_k''(y) \times [1 - g_{0k}(x)] \right\}.$$

На пластину действует гидростатическое давление $q(x,y) = (1+y)q_0/2$. В этом случае:

$$q_k(x) = h_k^{**}, h_k^{**} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 (1+y) h_k(y) dy; \quad (16)$$

$$\Phi_k(x) = \frac{h_k^{**}}{b_{kk}}; \quad \Phi'_k(x) = 0;$$

$$W = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h_k^{**}}{b_{kk}} h_k(y) [1 - g_{0k}(x)].$$

Рассмотрим случай, когда кромка $x = 0$ пластины оставлена свободной, а края $y = \pm 1$ защемлены. При решении этой задачи воспользуемся выражением (10) для функции $g_k(x)$, которое должно удовлетворять естественным граничным условиям на свободной кромке $x = 0$:

$$g_k''(0) + v a_{kk} g_k(0) = 0 \quad (17)$$

$$g_k'''(0) + (2-v) a_{kk} g_k'(0) = 0 \quad (18)$$

Подчиняя функции $g_k(x)$ граничным условиям (17) и (18), получим систему уравнений для определения C_{1k} и C_{2k} :

$$\left. \begin{aligned} C_{1k} [v a_{kk} - (\alpha_k^2 + \beta_k^2)] + C_{2k} (-2\alpha_k) &= \\ &= -[\Phi_k''(0) + v a_{kk} \Phi_k(0)]; \\ C_{1k} 2\alpha_k (\alpha_k^2 + \beta_k^2) + C_{2k} [3\alpha_k^2 - \beta_k^2 + (2-v) a_{kk}] &= \\ &= -[\Phi_k'''(0) + (2-v) a_{kk} \Phi_k'(0)]. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Рассмотрим случай равномерно распределенной нагрузки. Частное решение определим по формулам (13) и (14):

$$\Phi_k(x) = \Phi_k(0); \quad \Phi_k'(0) = \Phi_k''(0) = \Phi_k'''(0) = 0.$$

Из системы (19) находим:

$$\left. \begin{aligned} C_{1k} &= -\frac{1}{\Delta_k} [3\alpha_k^2 - \beta_k^2 + (2-v)] v \Phi_k(0) = -C_{1k}^* \Phi_k(0); \\ C_{2k} &= \frac{1}{\Delta_k} 2v \alpha_k (\alpha_k^2 + \beta_k^2) \Phi_k(0) = C_{2k}^* \Phi_k(0); \\ \Delta_k &= (\alpha_k^2 + \beta_k^2)^2 - [2\beta_k^2 + 2\alpha_k^2(1-2v) - v(2-v)]. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Здесь введены обозначения:

$$C_{1k}^* = \frac{v [3\alpha_k^2 - \beta_k^2 + (2-v)]}{\Delta_k},$$

$$C_{2k}^* = \frac{2v \alpha_k (\alpha_k^2 + \beta_k^2)}{\Delta_k}.$$

С учетом формул (2), (10), (9) и (20) найдем прогиб пластины:

$$W = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h_k^*}{b_{kk}} h_k(y) [1 - C_{1k}^* g_{0k}(x) + C_{2k}^* \varphi_{0k}(x)] \quad (21)$$

и изгибающий момент:

$$m_x = -\sum_{k=0}^{\infty} \frac{h_k^*}{b_{kk}} \left\{ v h_k''(y) [1 - C_{1k}^* g_{0k}(x) + C_{2k}^* \varphi_{0k}(x)] + h_k(y) \times [-C_{1k}^* g_k''(x) + C_{2k}^* \Phi_{0k}''(x)] \right\}.$$

Пусть теперь кромка пластины $x = 0$ свободно оперта, а кромки $y = \pm 1$ защемлены. Решение этой задачи может быть выражено через интегралы с бесконечными пределами.

Граничные условия для функции $g_k(x)$ на свободно опертой кромке $x = 0$ пластины будут выполнены, если принять:

$$g_k(0) = g_k''(0) = 0.$$

Окончательное выражение для прогиба пластины под равномерно распределенной нагрузкой:

$$W = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h_k^*}{b_{kk}} h_k(y) \left[1 - g_{0k}(x) + \frac{\alpha_k^2 + \beta_k^2}{2\alpha_k} \varphi_{0k}(x) \right]. \quad (22)$$

Для изгибающего момента:

$$m_x = \frac{M_x}{b^2 q_0} = - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{h_k^*}{b_{kk}} \left\{ h_k(y) \left[\frac{\alpha_k^2 + \beta_k^2}{2\alpha_k} \varphi_{0k}''(x) - g_{0k}''(x) \right] + v h_k''(y) \left[1 - g_{0k}(x) + \frac{\alpha_k^2 + \beta_k^2}{2\alpha_k} \varphi_{0k}(x) \right] \right\}.$$

Расчеты и анализ результатов

Рассмотрим численные результаты. Ряды (15), (16), (21) и (22) сходятся достаточно быстро. Для вычисления изгибающих моментов и перерезывающих сил следует сохранять большее число членов ряда.

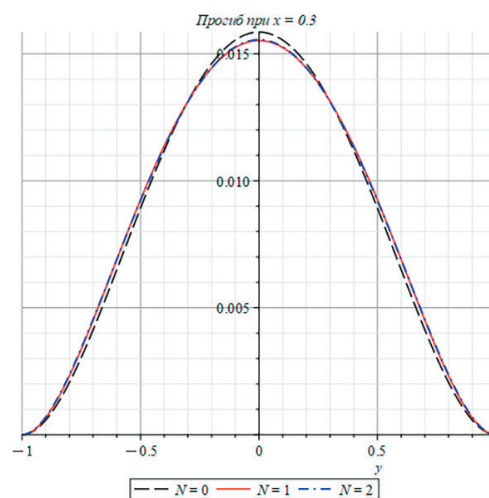
Пусть пластина находится под равномерно распределенной нагрузкой $q(x,y) = q_0 = \text{const}$. Для случая свободно опертой пластины по краю $x = 0$ примем $v = 0,2$ и, удерживая в соответствующем ряде три первых члена ($k = 0, k = 1, k = 2$), получим прогиб:

$$W_{\max} = 0,01555,$$

имеющий место при $x = 0,3, y = 0$ (рис. 1а).

Соответственно, максимальный изгибающий момент $M_{x,\max} = 0,05873$ имеет место при

а



б

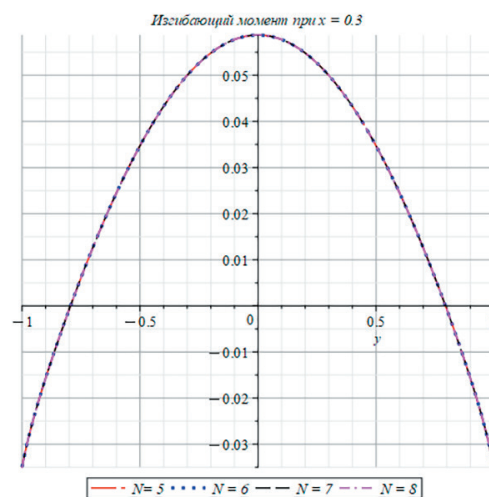


Рис. 1

$x = 0,3, y = 0$, если удержать шесть членов ряда ($k = 0, k = 1, \dots, k = 5$) (рис. 1б).

Для сравнения полученного решения была рассмотрена длинная прямоугольная изотропная пластина ($0 \leq \xi \leq a, -b \leq \eta \leq b$). Введем безразмерные координаты $x = \xi / b, y = \eta / b, y|_{\eta = \pm b} = \pm 1, x|_{\xi = 0} = 0$ так, что $0 \leq x \leq \lambda = a / b, -1 \leq y \leq 1$.

Введем безразмерный прогиб $W = Dw / (b^4 q_0)$, где q_0 — характерный размер поперечной нагрузки. Тогда уравнение изгиба принимает вид (1). Рассматривается пластина, защемленная при $y = \pm 1$ и шарнирно опертая при

$x = 0$ и $x = \lambda = a / b$, давление $q(x, y) = q_0 = \text{const}$.

Рассматриваемая задача имеет точное решение в форме М. Леви:

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(y) \sin(\beta_n x), \beta_n = \frac{n\pi}{\lambda},$$

где функции $f_n(y)$ определяются как решения краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^4}{dy^4} f_n(y) - 2\beta_n^2 \frac{d^2}{dy^2} f_n(y) + \beta_n^4 f_n(y) &= q_n(y), \\ f_n(y)|_{y=\pm 1} &= 0, f_n'(y)|_{y=\pm 1} = 0, \\ q_n(y) &= \frac{2}{\lambda} \int_0^{\lambda} \frac{q(x, y)}{q_0} \sin(\beta_n x) dx. \end{aligned} \right\} (23)$$

Задача (23) легко решается. Общее решение дифференциального уравнения (23):

$$\begin{aligned} f_n(y) &= C_{1,n} \operatorname{ch}\left(\frac{n\pi y}{\lambda}\right) + C_{2,n} y \operatorname{ch}\left(\frac{n\pi y}{\lambda}\right) + \\ &+ C_{3,n} \operatorname{sh}\left(\frac{n\pi y}{\lambda}\right) + C_{4,n} y \operatorname{sh}\left(\frac{n\pi y}{\lambda}\right) - \\ &\frac{2\lambda^4 \left((-1)^n - 1\right)}{n^5 \pi^5}. \end{aligned}$$

После подстановки этого решения в граничные условия (23) и определения произвольных постоянных $C_{1k}, C_{2k}, C_{3k}, C_{4k}$ получаем:

$$\left. \begin{aligned} C_{1,n} &= \frac{2\lambda^4 \left((-1)^n - 1\right) \left(\pi \operatorname{ch}\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right) n + \operatorname{sh}\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right) \lambda\right)}{n^5 \pi^5 \left(\operatorname{sh}\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right) \lambda \operatorname{ch}\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right) + n\pi\right)}, \\ C_{2,n} &= 0, C_{3,n} = 0, \\ C_{4,n} &= -\frac{2\lambda^4 \left((-1)^n - 1\right) \operatorname{sh}\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right)}{\pi^4 n^4 \left(\operatorname{sh}\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right) \lambda \operatorname{ch}\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right) + n\pi\right)}. \end{aligned} \right\}$$

Из последних формул видим, что отличными от нуля будут только члены ряда с нечетными индексами.

Для сравнения приведем максимальное значение прогиба при $x = 0,3; y = 0$ в случае длинной пластины ($0 \leq x \leq \lambda, -1 \leq y \leq 1$) при $\lambda = 5$:

$$W_{max}^{exact} = 0,01561. \quad (24)$$

Результат (24) получен как точное решение краевой задачи в форме М. Леви при удержании семи членов ряда ($n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$). Погрешность с решением для полубесконечной пластины составляет:

$$\left| \frac{W_{max}^{exact} - W_{max}}{W_{max}^{exact}} \right| \cdot 100\% \approx 0,37\%.$$

Соответственно, изгибающий момент при $x = 0,3; y = 0$:

$$M_{x,max}^{exact} = 0,05874. \quad (25)$$

Результат (25) получен как точное решение краевой задачи в форме М. Леви при удержании 30 членов ряда.

Погрешность с решением для полубесконечной пластины составляет:

$$\left| \frac{M_{x,max}^{exact} - M_{x,max}}{M_{x,max}^{exact}} \right| \cdot 100\% \approx 0,017\%.$$

Для случая защемленной по краю $x = 0$ полубесконечной пластины, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой $q(x, y) = q_0 = \text{const}$, примем $\nu = 0,2$ и, удерживая в соответствующем ряде три первых члена ($k = 0, k = 1, k = 2$), получим прогиб:

$$W_{max} = 0,00674,$$

имеющий место при $x = 0,3; y = 0$ (рис. 2а).

Соответственно, максимальный изгибающий момент:

$$W_{max} = -0,03880$$

имеет место при $x = 0,3; y = 0$, если удерживать семь членов ряда ($k = 0, k = 1, \dots, k = 6$) (рис. 2б).

Для сравнения полученного решения была рассмотрена длинная прямоугольная изотропная пластина ($0 \leq \xi \leq a, -b \leq \eta \leq b$). Введем безразмерные координаты $x = \xi / b, y = \eta / b, y|_{\eta=\pm b} = \pm 1, x|_{\xi=0} = 0$ так, что $0 \leq x \leq \lambda = a / b, -1 \leq y \leq 1$. Введем безразмерный прогиб

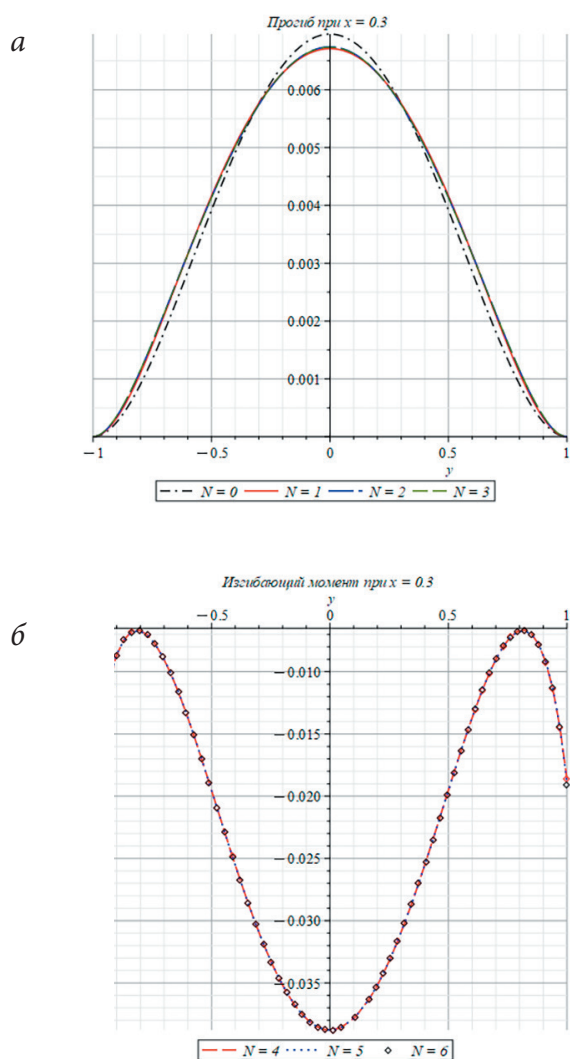


Рис. 2

$W = Dw/b^4 q_0$, где q_0 — характерный размер поперечной нагрузки. Тогда уравнение изгиба принимает вид (1). Граничные условия: защемление при $y = \pm 1$ и $x = 0, \lambda$. Поперечная нагрузка: $q(x, y) = q_0 = \text{const}$.

Рассматриваемая задача не имеет точного решения. Будем искать решение методом Бубнова — Галеркина в форме:

$$V = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} V_{m,n} g_m(x) h_n(y),$$

где функции $g_m(x)h_n(y)$ — ортонормированные функции, удовлетворяющие однородным граничным условиям:

$$h_n(\pm 1) = 0, h_n'(\pm 1) = 0,$$

$$g_n(0) = 0, g_n(\lambda) = 0, g_n'(0) = 0, g_n'(\lambda) = 0,$$

построенные на основе степенных функций $\{(x - \lambda)^2 x^{m+1}\}_{m=1}^{\infty}, (y^2 - 1)^2 y^{n-1}\}_{n=1}^{\infty}$ и ортонормированные с помощью процесса ортогонализации Грамма — Шмидта.

Для сравнения приведем максимальное значение прогиба при $x = 0,3; y = 0$ в случае длинной пластины ($0 \leq x \leq \lambda, -1 \leq y \leq 1$) при $\lambda = 5$:

$$V_{\max} = 0,00683. \quad (26)$$

Результат (26) получен при удержании по пять членов ряда по каждой переменной ($m, n = 1, 3, 5, \dots, 9$). Погрешность с решением для полубесконечной пластины составляет:

$$\left| \frac{V_{\max} - W_{\max}}{V_{\max}} \right| \cdot 100\% \approx 1,32 \%$$

Соответственно, изгибающий момент при $x = 0,3; y = 0$:

$$M_{x,\max}^{\text{Bubnov}} = -0,03740. \quad (27)$$

Результат (27) получен при удержании по семь членов ряда по каждой переменной ($m, n = 1, 3, 5, \dots, 13$).

Погрешность с решением для полубесконечной пластины составляет:

$$\left| \frac{M_{x,\max}^{\text{Bubnov}} - M_{x,\max}}{M_{x,\max}^{\text{Bubnov}}} \right| \cdot 100\% \approx 3,74 \%$$

Аналогичным приемом можно решить краевые задачи об изгибе полубесконечной пластины под действием произвольной нагрузки при любом закреплении края $x = 0$: а) противоположные кромки $y = \pm 1$ свободно оперты; б) один край $y = -1$ защемлен, а другой $y = 1$ свободно оперт.

Для случая полубесконечной пластины, у которой один противоположный край защемлен, а другой свободно оперт при любом закреплении третьего края $x = 0$, в выражении

(1) следует заменить полиномы $h_k(y)$ на другие полиномы Якоби, которые удовлетворяют соответствующим однородным граничным условиям. При этом структура дифференциальных уравнений для определения функций $g_k(y)$ полностью сохраняется.

Список источников

1. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 636 с.
2. Гопалачариулу. Защемленные полубесконечные пластины // Прикладная механика. 1966. № 1. С. 195–197.
3. Голоскоков П.Г. Изгиб прямоугольной плиты, жестко заделанной по двум противоположным сторонам // Изв. вузов. Сер: Строительство и архитектура. 1959. № 11–12. С. 25–34.
4. Канторович Л.В. Использование идеи метода Галеркина в методе приведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям // ПММ. 1942. Вып. 6. С. 31–40.
5. Аверьянова Г.В., Голоскоков Д.П. Расчет тонких пластин при помощи полиномов специального вида // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 1. С. 70–76.
6. Голоскоков Д.П., Голоскоков П.Г. Метод полиномов в задачах теории тонких плит. СПб.: СПГУВК, 2008. 254 с.
7. Голоскоков Д.П., Матросов А.В., Олемской И.В. Изгиб защемленной тонкой изотропной пластины методом Канторовича с использованием специальных полиномов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2023. Т. 19, вып. 4. С. 423–442.
8. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Bending of clamped orthotropic thin plates: polynomial solution // Mathematics and Mechanics of Solids. 2022. Vol. 27, no 11. Pp. 2498–2509.
9. Сеге Г. Ортогональные многочлены. М.: Физматлит, 1962.

Дата поступления: 05.11.2025

Решение о публикации: 30.01.2026

Контактная информация

ГОЛОСКОКОВ Дмитрий Петрович — д-р техн. наук, профессор; dpg1954@mail.ru
МАТРОСОВ Александр Васильевич — д-р физ.-мат. наук, доцент; avmatrosov@mail.ru

A polynomial solution for bending a semi-infinite rectangular plate

D. P. Goloskokov¹, A. V. Matrosov²

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

²Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya nab., Saint Petersburg, 190029, Russia

For citation: Goloskokov D. P., Matrosov A. V. A polynomial solution for bending a semi-infinite rectangular plate // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 154–162. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-154-162. (In Russian)

Abstract

Objective: to investigate the stress-strain state of a thin, homogeneous, isotropic, semi-infinite rectangular plate that is clamped along two parallel edges, with the third edge considered either fixed or free. The study also aims to demonstrate that the derived semi-infinite plate solution can be applied to assess stress-strain fields in finite-size rectangular plates. **Methods:** the issue is tackled using L. V. Kantorovich's method with

trial (basis) functions constructed from Jacobi polynomials that satisfy the boundary conditions on the parallel clamped edges of the semi-infinite plate. These basis functions exhibit quasi-orthogonality properties for their first and second derivatives, which permits separation of the coupled ordinary differential equations produced by Kantorovich's procedure into independent ordinary differential equations that admit analytical solutions. **Results:** an approximate analytical solution for the bending of the semi-infinite rectangular plate has been obtained various clamping configurations of the plate. The derived solution demonstrates rapid convergence for both deflections and bending moments. It is shown that the stress-strain state of finite-size rectangular plates can be effectively investigated by applying the solution of the semi-infinite plate bending. To facilitate this approach, solutions for several boundary-condition configurations of the finite-size rectangular plate-bending issues have been developed. Namely, the Bubnov-Galerkin solution was used for a plate clamped along its contour, and M. Levy's solution was employed for a plate clamped along two parallel edges and pinned along the remaining two. **Practical importance:** the algorithm proposed herein for solving semi-infinite plate bending issues is recommended for practical application in determining the stress-strain state of finite-size rectangular plates.

Keywords: Semi-infinite rectangular plate, plate bending, L. V. Kantorovich method, Bubnov — Galerkin method, M. Levy solution, Jacobi polynomials

References

1. Timoshenko S.P., Vojnovskij-Kriger S. *Plastinki i obolochki*. M.: Nauka, 1966. 636 s. (In Russian)
2. Gopalachariulu. *Zashchemlennye polubeskonechnye plastiny // Prikladnaya mekhanika*. 1966. No. 1. S. 195–197. (In Russian)
3. Goloskokov P.G. *Izhib pryamougol'noj plity, zhestko zadelannoj po dvum protivopolozhnym storonom // Izv. vuzov. Ser: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1959. No. 11–12. S. 25–34. (In Russian)
4. Kantorovich L.V. *Ispol'zovanie idei metoda Galerkina v metode privedeniya k obyknovennym differentsial'nym uravneniyam // PMM*. 1942. Vyp. 6. S. 31–40. (In Russian)
5. Aver'yanova G. V., Goloskokov D.P. *Raschet tonkikh plastin pri pomoshchi polinomov spetsial'nogo vida // Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*. 2004. No. 1. S. 70–76. (In Russian)
6. Goloskokov D.P., Goloskokov P.G. *Metod polinomov v zadachakh teorii tonkikh plit*. SPb.: SPGUVK, 2008. 254 s. (In Russian)
7. Goloskokov D.P., Matrosov A. V., Olemskoj I. V. *Izhib zashchemlennoj tonkoj izotropnoj plastiny metodom Kantorovicha s ispol'zovaniem spetsial'nykh polinomov // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*. 2023. T. 19, vyp. 4. S. 423–442. (In Russian)
8. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. *Bending of clamped orthotropic thin plates: polynomial solution // Mathematics and Mechanics of Solids*. 2022. Vol. 27, no. 11. Pp. 2498–2509.
9. Sege G. *Ortogonal'nye mnogochleny*. M.: Fizmatlit, 1962. (In Russian)

Received: 05.11.2025

Accepted: 30.01.2026

Author's information:

Dmitrij P. GOLOSKOKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; dpg1954@mail.ru

Aleksandr V. MATROSOV — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Associate Professor; avmatrosov@mail.ru

УДК 628.31

Выбор технологии обработки осадка городских сточных вод

О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская

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

Для цитирования: Капинос О. Г., Твардовская Н. В. Выбор технологии обработки осадка городских сточных вод // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 163–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-163-171

Аннотация

Цель: выявить основные направления технологии обработки осадка городских сточных вод, позволяющие получать товарный продукт и экономическую выгоду. Представить методы обработки осадка, которые наряду с получением товарного продукта обеспечивают охрану окружающей среды от загрязняющих веществ. Обосновать выбор технологических схем обработки осадка в соответствии с существующим законодательством и с учетом влияния образующихся при этом иловых вод на эффективность работы станций очистки городских канализационных стоков. **Методы:** проведены всесторонний анализ и систематизация существующих нормативных документов в области обработки, утилизации и ликвидации осадков, образующихся в процессе очистки городских сточных вод. Выполнены сравнение и анализ воздействия различных технологий обработки осадка на сооружения механической и биологической очистки городской канализационной станции. **Результаты:** рассмотрены современные критерии оценки эффективности технологий обработки и утилизации осадков городских сточных вод. Представлен необходимый минимум стадий обработки осадка, позволяющий предотвращать негативное воздействие на окружающую среду как при обработке, так и при утилизации осадка. Показаны основные современные сооружения и устройства обработки осадка, которые как сразу при внедрении, так и в долгосрочной перспективе способствуют повышению экологической эффективности городской канализационной станции. Выявлены устройства и сооружения, модернизация и/или реконструкция которых позволяет производить в конце технологической цепочки обработки осадка товарный продукт, востребованный на рынке. **Практическая значимость:** результаты демонстрируют превалирующие современные тенденции в подходе к обработке осадка и переход от обязательности простого обезвоживания осадка к возможности и необходимости получения прибыли при его утилизации. Предлагаемые пути повышения эффективности утилизации осадка от городских канализационных станций с применением наилучших доступных технологий позволяют минимизировать негативное влияние на окружающую среду. Представленные технологические схемы обработки осадков, образующихся на городских очистных сооружениях, позволяют достигать как экологической безопасности, соответствующей современным требованиям, так и экономической эффективности.

Ключевые слова: осадок, городские сточные воды, обезвоживание, утилизация, ликвидация, экологическая безопасность, экономическая эффективность

Введение

Ежегодно в процессе очистки сточных вод на городских очистных станциях в России образуется около 7 млн т осадка. На территории канализационной очистной станции в обяза-

тельном порядке должно быть произведено обезвоживание осадка [1].

Однако в течение длительного времени с момента введения в эксплуатацию канализационных станций обезвоживание осадка

производилось на иловых площадках. Несмотря на то что уже более 20 лет существуют устройства механического обезвоживания (фильтр-прессы и центрифуги) [1–3], позволяющие производить этот процесс быстрее, эффективнее, безопаснее в санитарно-гигиеническом и экологическом плане, иловые площадки, заполненные осадком, занимают огромную территорию и являются источником возможного загрязнения атмосферы, почвы и грунтовых вод [4]. На рис. 1 представлено состояние городских канализационных очистных сооружений, вызванное многолетней эксплуатацией иловых площадок [5].

В активном иле, отделяемом от биологически очищенных сточных вод, содержится такая концентрация азота, фосфора и других органических веществ, что по своим агрономическим качествам он сходен с ценными органическими удобрениями. До начала 80-х годов XX века в Российской Федерации существовала практика применения стабилизированных обезвоженных осадков канализационных станций в качестве удобрений для сельского хозяйства.

По мере накопления опыта применения осадков в качестве удобрений появилось понимание, что при сборе городской канализационной сетью как атмосферных сточных вод, так и промышленных стоков концентрация токсичных тяжелых металлов в получаемом осадке превышает предельно допустимые концентрации в случае внесения осадков в качестве удобрения.

Решением в подобной ситуации могло быть:

1. Применение оборотных и замкнутых систем на промышленных предприятиях с последующей очисткой производственного стока на местных очистных сооружениях, перед тем как он будет сброшен в городскую сеть или поверхностные водные источники.

2. Реконструкция самих канализационных сетей с устройством отдельной системы для сбора атмосферных стоков и их очисткой на локальных очистных сооружениях и сбросом в поверхностные водоемы [6].

3. Применение более дорогостоящей физико-химической очистки всего расхода сточных вод, поступающего на городскую станцию, с целью извлечения тяжелых металлов,

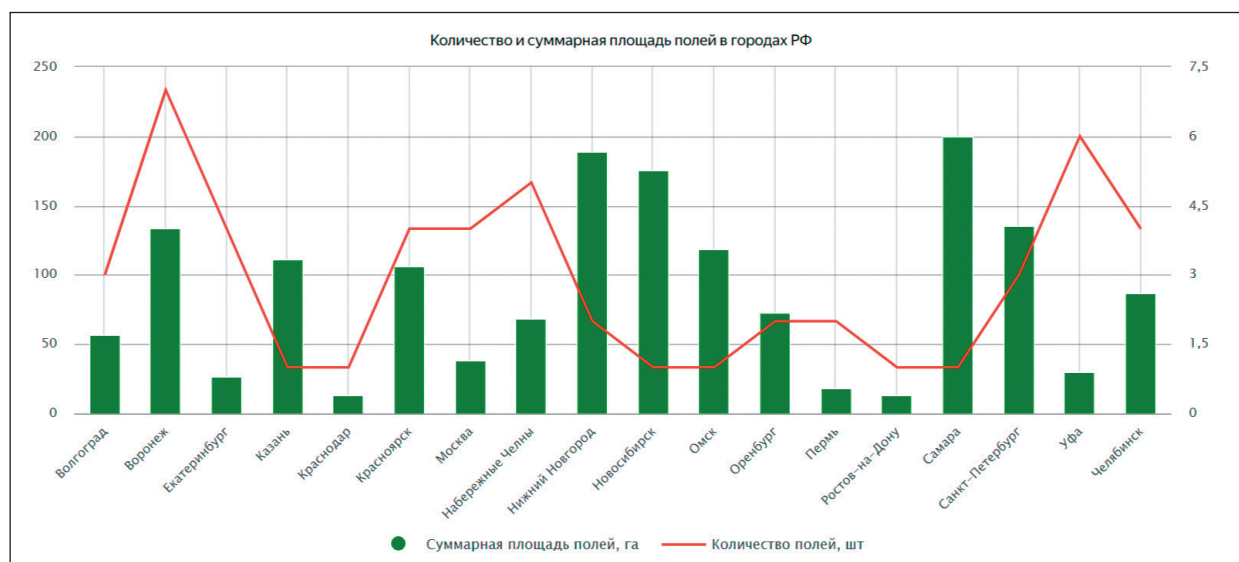


Рис. 1. Количество и суммарная площадь иловых площадок в городах Российской Федерации на 2023 год [5]

количество которых превышает нормы, допустимые при последующем использовании образующихся осадков в качестве удобрения в сельском хозяйстве.

В связи с отсутствием на тот момент доступной и эффективной технологии утилизации осадка более простым и удобным способом казалось полное прекращение использования его как удобрения, что привело к превалированию в течение несколько десятилетий только метода обезвоживания и, как следствие, к полной заполняемости карт иловых площадок в короткие сроки.

Современное законодательство и технологии по обработке осадков городских сточных вод в Российской Федерации

В современных условиях требуется не только превращение жидких быстроагнивающих осадков сточных вод в безопасные, легкотранспортирующиеся обезвоженные массы [1], но и получение товарного продукта.

Общие требования к физическим и химическим параметрам осадков, включая предельно допустимые концентрации токсичных элементов, для последующего использования в качестве органических или органоминеральных удобрений, для рекультивации земель и при размещении на полигонах приведены в ГОСТ Р 59748-2021 «Технические принципы обработки осадков сточных вод» [3]. В этом документе перечислены возможные методы предварительной обработки осадка для использования конечного продукта в различных целях, а также даны основные рекомендации по оптимизации технологий обработки осадка для предотвращения или снижения негативного воздействия на экологическую ситуацию.

Перед использованием любой товарный продукт, произведенный на основе осадков сточных вод, должен быть подвергнут обязательной экологической сертификации. Характеристики

гранулометрического состава, химического состава, влажность должны соответствовать:

- при использовании в качестве органических удобрений [7, 8];
- при использовании в качестве почвогрунтов, рекультивантов, инертного материала для биологической и технической рекультивации нарушенных земель [9, 10];
- при использовании в качестве перестилляющих и изолирующих слоев на полигонах захоронения отходов [11].

Экологическая сертификация почвогрунтов является добровольной процедурой. Однако почвогрунты вырабатываются в процессе компостирования, продуктом которого формально является агрохимикат, и для него сертификация является обязательной.

Перед выдачей свидетельства о государственной регистрации агрохимиката сроком на 10 лет проводятся испытания, которые обычно длятся более 1,5 года. Уполномоченная и аккредитованная организация обязана проверить соответствие продукта по токсиколого-гигиеническим, биологическим и экологическим показателям и пройти экспертизу в Роспотребнадзоре, Росприроднадзоре и Минсельхозе России. Сведения вносятся в Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, что дает разрешение на производство, применение, реализацию, транспортировку, хранение, уничтожение, рекламу, ввоз в Российскую Федерацию и вывоз из Российской Федерации агрохимиката.

С 1 января 2025 года регламентировано обязательное использование отходов (вторичного сырья) при производстве почвогрунта, а минимальная доля должна составлять не менее 10%.

Выработка на территории станции в процессе анаэробного сбраживания осадка биогаза, состоящего на 60–67% из метана, 30–33% углекислоты, 1–2% водорода, около 0,5% азота, позволяет вырабатывать электроэнергию,

которая удовлетворяет до 30% суточной потребности станции очистки стоков [12]. Расчет основных и вспомогательных сооружений, планировочные решения описаны в [1], а основные технологические моменты предварительной обработки осадка и требования, предъявляемые к его характеристикам перед подачей в метантенки, — в [3].

Основным отличием анаэробного (метанового) сбраживания от других методов являются не только стабилизация и обеззараживание осадка, но и, главное, возможность получения энергоресурсов, которые позволяют обеспечивать аварийное энергообеспечение основных технологических процессов на канализационной очистной станции в нештатной ситуации. На сегодняшний день ни одна другая технология обработки осадка не позволяет автономно поддерживать работоспособность станции очистки городского стока. Обязательно предусматриваются мероприятия по защите от за-

грязнения грунтовых и поверхностных вод, атмосферного воздуха и почв с соблюдением нормативных значений [4]. Для примера в табл. 1 представлено сравнение возможных вариантов технологий обработки осадка, образующегося на Центральной станции аэрации города Санкт-Петербурга [13]. Здесь приведены наиболее востребованные технологии обработки осадка, описаны необходимые стадии производственного процесса, учтена возможность получения товарного продукта.

Рекомендации об устройствах и современных конструкциях печей для сжигания осадка представлены в [1], а выбор предварительной технологии обработки нужно осуществлять с учетом необходимых стадий подготовки осадка, обеспечивающих эффективное сжигание с минимальным энергопотреблением и предотвращение загрязнения окружающей среды [3].

При подсчете себестоимости обработки осадка при его сжигании учитывалась и стои-

ТАБЛИЦА 1. Сравнение технологий по утилизации осадка сточных вод (применительно к Центральной станции аэрации города Санкт-Петербурга)

Параметры	Сжигание	Анаэробное сбраживание	Компостирование осадков
Стадии производственного процесса	Обезвоживание до влажности 70–85% Сушка до влажности 30–35% Сжигание при температуре 700–1000 °С	Первичное уплотнение со снижением влажности менее 95% Анаэробное сбраживание Вторичное обезвоживание до влажности 70–85% Деаммонизация фугата Сушка	Обезвоживание до влажности 70–85%. Компостирование с принудительной аэрацией и с системами предотвращения выделения или очистки выбросов от запахов
Потребность очистной станции в электроэнергии от внешних источников	93%	70%	100%
Обеспечение резервного электроснабжения	Покрывает на 7% потребности в электроэнергии (главная насосная станция очистных сооружений — ГНС)	Покрывает на 30% потребности в электроэнергии (ГНС и воздухоудовки)	Не обеспечивает
Товарный продукт	Зола	Биогаз	Техногрунт
Себестоимость обработки осадка, приведенная к 1 т сточных вод, тыс. руб. (цены 2019 года)	8,8	10,6	При наличии рынка сбыта себестоимость обработки ниже цены продажи техногрунта

мость системы газоочистки. Многоступенчатая схема очистки дымовых газов включает в себя:

- освобождение от пыли в электрофильтрах, где задерживается 92–99% частиц тяжелых металлов;
- охлаждение с 300 до 80 °С в кислой водной среде с одновременным улавливанием кислотных примесей и возгонов тяжелых металлов;
- улавливание сернистого ангидрида в промывной колонне с щелочным раствором.

В применяемой схеме газоочистки вода используется по замкнутому циклу с минимальным процентом подпиточной воды, а следовательно, и небольшое количество воды после предварительной нейтрализации подается в начальную точку очистных сооружений.

Принятая схема газоочистки соответствует современным российским требованиям к выбросам загрязняющих веществ в окружающую среду.

Кроме того что получаемая при сжигании зола имеет меньший объем и влажность, следовательно, значительно уменьшаются затраты на перевозку и захоронение, она является ценным ресурсом. Наиболее очевидным является применение золы при изготовлении строительных материалов. Однако необходимость получения в таком случае гигиенического сертификата и наличие достаточно дешевой сырьевой базы в России приводят к тому, что пока такой процесс остается нерентабельным. На сегодняшний день в Санкт-Петербурге образующая зола вывозится на полигоны и захоранивается в соответствии с санитарными нормами.

Фосфор, который является ценным биогенным элементом, при сжигании не улетучивается, а концентрируется в золе, и существуют технологии по извлечению и повторному использованию фосфора как в сельском хозяйстве, так и в промышленных процессах. В России на сегодняшний день нет недостатка в легкодоступных

залежах фосфора, поэтому нет и спроса на извлечение фосфора из золы. Но в связи с ускорением деградации ресурсов фосфорита во всем мире необходимо развивать технологии повторного использования фосфора.

Результаты и обсуждения

В настоящее время основным методом обработки осадка на территории станции очистки сточных вод является механическое обезвоживание. На станциях суточной производительностью по обрабатываемой сточной воде более 4 тыс. м³/сут. иловые площадки допускаются только в качестве резервных сооружений, а в случае производительности станции более 10 тыс. м³/сут. необходимо производить ее реконструкцию и переоснащение для эксплуатации даже без резервных иловых площадок [1].

После обезвоживания на большинстве очистных сооружений населенных пунктов России осадок только вывозится и захоранивается на полигонах, что непосредственно приводит к увеличению нагрузки по загрязнению окружающей среды в целом всего поселения [14, 15].

Опыт эксплуатации очистных сооружений города Санкт-Петербурга на протяжении уже нескольких десятилетий показывает преимущества технологии сжигания осадка. Сжигание осадка не позволяет получать значительный энергетический эффект по сравнению с технологией метанового сбраживания или востребованный на рынке техногрунт, как при компостировании осадка (см. табл. 1). Данная технология надежна, устойчива и позволяет значительно минимизировать негативное воздействие на окружающую среду как на самой станции, так и в целом в населенном пункте, в том числе за счет отсутствия выброса в атмосферу вредных веществ и распространения запаха.

На канализационных очистных сооружениях города Москвы исторически сложилась

технология метанового сбраживания осадка, которая позволяет станции быть энергонезависимой для обеспечения основных потребностей процесса очистки сточных вод и обработки осадка, особенно при возникновении нештатных ситуаций. Наряду с этим при эксплуатации самой станции очистки возникают сложности, связанные с необходимостью обработки возвратных потоков воды (фугата), выделяемой при обезвоживании сброженного осадка, иначе поступающий фугат существенно негативно влияет на эффективность биологической очистки от биогенных элементов [16]. Сброженный осадок имеет недостаточную для последующего эффективного сжигания или компостирования зольность, поэтому обычно после необходимого обезвоживания он вывозится на полигоны захоронения.

Одновременно в Подмосковье в 2019 году была запущена современная система переработки отходов с закрытием всех старых мусорных полигонов. На новых полигонах организована ставшая уже традиционной схема: сортировка твердых коммунальных отходов с извлечением вторсырья и активной органики для компостирования; участок компостирования органической фракции (производства технического грунта); вновь построенные карты (то есть полигоны) для размещения «хвостов». Сама технология компостирования включена в реестр наилучших доступных технологий [2] и позволяет получать почвогрунты с различными характеристиками в зависимости от изначального состава отходов и особенностей технологического процесса (длительность обработки, интенсивность обдувки воздухом, температура и другие). Несмотря на то что обычно данные отходы относятся к IV–V классу опасности, в Москве и Подмосковье за последние 5 лет сформировалась потребность в таких техногрунтах для технической и биологической рекультивации.

Заключение

Безопасная, эффективная, надежная технологическая схема обработки осадков является основой работы канализационных очистных сооружений в целом.

Решение проблемы обработки и утилизации осадка городских сточных вод состоит в нахождении оптимальной в существующих конкретных условиях технологии, позволяющей решить следующие задачи:

- не вносить существенных изменений в состав и качество сточных вод за счет поступающей на очистку инфильтрационной воды, выделяемой из обезвоженного осадка;
- сам процесс обработки не должен ухудшать санитарно-гигиенического и экологического состояния площадки канализационной станции;
- процессы очистки сточной воды и обработки осадка очень дорогостоящие, поэтому вместо захоронения обезвоженного осадка необходимо изыскивать возможности и изначально планировать получение в процессе утилизации осадка экономической выгоды в виде фосфора, извлекаемого из золы; удобрений, почвогрунтов, техногрунтов и биогаза в качестве источника получения энергии.

Список источников

1. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения: 27.10.2025).
2. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889> (дата обращения: 27.10.2025).
3. ГОСТ Р 59748-2021. Технические принципы обработки осадков сточных вод // Электронный

фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181170> (дата обращения: 27.10.2025).

4. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lyh385ice0647155951> (дата обращения: 27.10.2025).

5. Геопространственная аналитика // Электронный фонд Госкорпорации «Роскосмос» и АО «Терра Тех» geonovosti.terratech.ru. URL: <https://geonovosti.terratech.ru/social/rekultivatsiya-ilovykh-poley-v-rossii/> (дата обращения: 27.10.2025).

6. Твардовская Н. В., Черников Н. А. Отведение и очистка поверхностного стока с территории транспортных объектов // V Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов: в 2 т. СПб., 2023. С. 176–179.

7. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200017708> (дата обращения: 27.10.2025).

8. ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092626> (дата обращения: 27.10.2025).

9. ГОСТ Р 54534-2011. Ресурсосбережение. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092647> (дата обращения: 27.10.2025).

10. ГОСТ Р 59057-2020. Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL:

<https://docs.cntd.ru/document/566277874> (дата обращения: 27.10.2025).

11. ГОСТ Р 54535-2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при размещении и использовании на полигонах // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092648> (дата обращения: 27.10.2025).

12. Технология обработки и утилизации осадков природных и сточных вод: учебное пособие / В. Г. Иванов [и др.]. СПб., 2016. 81 с.

13. Рублевская О. Н., Пробринский М. Д. Реконструкция завода сжигания осадков на Центральной станции аэрации Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 1. С. 23–29.

14. Капинос О. Г., Твардовская Н. В. Критерии оценки эффективности технологий очистки городских сточных вод в соответствии с современным законодательством // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 4. С. 891–901.

15. Парамонова Л. Н. Пути повышения эффективности очистки сточных вод // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 2. С. 324–331.

16. Соловьева Е. А. Технология очистки сточных вод и обработки осадков при глубоком удалении азота и фосфора из сточных вод // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13, вып. 1 (46). С. 93–99.

Дата поступления: 17.11.2025

Решение о публикации: 06.02.2026

Контактная информация:

КАПИНОС Ольга Геннадьевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; olk1975@mail.ru
ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; tvardovskaya@pgups.ru

Methods for urban wastewater sludge treatment

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya

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

For citation: *Kapinos O.G., Tvardovskaya N.V. Methods for urban wastewater sludge treatment // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 163–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-163-171. (In Russian)*

Abstract

Objective: to identify the main technological approaches for treating urban wastewater sludge that will enable production of marketable products and generation of economic benefits. To present sludge treatment methods that, in addition to producing marketable outputs, will prevent environmental contamination. To justify the selection of technological schemes for sludge treatment in accordance with current legislation, taking into account the impact of liquid effluents released during treatment on the operational efficiency of municipal sewage treatment plants. **Methods:** a comprehensive analysis and systematization of existing regulatory documents concerning the treatment, disposal and elimination of sediments generated during urban wastewater treatment were undertaken. A comparative assessment was conducted of the effects that various sludge treatment technologies exert on the mechanical and biological treatment facilities of municipal sewage plants. **Results:** contemporary criteria for evaluating the effectiveness of technologies for treating and disposing of urban wastewater sludge were considered. A minimal required sequence of sludge treatment stages has been proposed to prevent adverse environmental impacts during both sludge treatment and disposal. The principal modern structures and devices for sediment processing, have been identified, which, both immediately upon implementation and over the long term, will contribute to improving the environmental performance of municipal sewage plants. Devices and structures suitable for modernization and/or reconstruction have been identified. Their upgrade will permit the production of market-demanded products at the final stages of the sludge-processing chain. **Practical significance:** the findings reflect current trends in sludge management, evidencing a shift from the obligatory basic dewatering toward opportunities and imperatives for generating revenue from sludge disposal. The proposed measures to improve sludge disposal efficiency at municipal sewage treatment facilities, based on best available technologies, will minimize adverse environmental impacts. The proposed technological schemes for processing sediments from urban treatment facilities will ensure compliance with contemporary environmental safety requirements while maintaining economic efficiency.

Keywords: sediment, municipal wastewater, dewatering, disposal, elimination, environmental safety, economic efficiency

References

1. SP 32.13330.2018. Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)
2. ITS 10-2019. Ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poselenij, gorodskikh okrugov // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)
3. GOST R 59748-2021. Tekhnicheskie printsipy obrabotki osadkov stochnykh vod // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181170> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)
4. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy

obitaniya // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lyh385ice0647155951> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)

5. Geoprostranstvennaya analitika // Elektronnyj fond Goskorporatsii “Roskosmos” i AO “Terra Tekh” geonovosti.terratech.ru. URL: <https://geonovosti.terratech.ru/social/rekultivatsiya-iloovykh-poley-v-rossii/> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)

6. Tvardovskaya N.V., Chernikov N.A. Otvedenie i ochistka poverkhnostnogo stoka s territorii transportnykh ob’ektov // V Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov: v 2 t. SPb., 2023. S. 176–179. (In Russian)

7. GOST R 17.4.3.07-2001. Okhrana prirody. Pochvy. Trebovaniya k svojstvam osadkov stochnykh vod pri ispol’zovanii ikh v kachestve udobrenij // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200017708> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)

8. GOST R 54651-2011. Udobreniya organicheskie na osnove osadkov stochnykh vod // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092626> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)

9. GOST R 54534-2011. Resursosberezhenie. Trebovaniya pri ispol’zovanii dlya rekul’tivatsii narushennykh zemel’ // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092647> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)

10. GOSTR 59057-2020. Okhrana okruzhayushchej sredy. Zemli. Obshchie trebovaniya po rekul’tivatsii narushennykh zemel’ // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566277874> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)

11. GOST R 54535-2011. Resursosberezhenie. Osadki stochnykh vod. Trebovaniya pri razmeshchenii

i ispol’zovanii na poligonakh // Elektronnyj fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092648> (data obrashcheniya: 27.10.2025). (In Russian)

12. Tekhnologiya obrabotki i utilizatsii osadkov prirodnykh i stochnykh vod: uchebnoe posobie / V.G. Ivanov [i dr.]. SPb., 2016. 81 s. (In Russian)

13. Rublevskaya O.N., Probirskij M.D. Rekonstruktsiya zavoda szhiganiya osadkov na Tsentral’noj stantsii aeratsii Sankt-Peterburga // Vodospabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2017. No. 1. S. 23–29. (In Russian)

14. Kapinos, O. G. Tvardovskaya N. V. Kriterii otsenki effektivnosti tekhnologij ochistki gorodskikh stochnykh vod v sootvetstvii s sovremennym zakonodatel’stvom // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, vyp. 4. S. 891–901. (In Russian)

15. Paramonova L. N. Puti povysheniya effektivnosti ochistki stochnykh vod // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, vyp. 2. S. 324–331. (In Russian)

16. Solov’eva E.A. Tekhnologiya ochistki stochnykh vod i obrabotki osadkov pri glubokom udalenii azota i fosfora iz stochnykh vod // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2016. T. 13, vyp. 1 (46). S. 93–99. (In Russian)

Received: 17.11.2025

Accepted: 06.02.2026

Author’s information:

Olga G. KAPINOS — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Water supply, sewerage and hydraulics”; olk1975@mail.ru

Nadezhda V. TVARDOVSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of “Water supply, sewerage and hydraulics”; tvardovskaya@pgups.ru

УДК 531.8

Динамический анализ захватного устройства робота-манипулятора

Е. В. Опарина

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

Для цитирования: Опарина Е. В. Динамический анализ захватного устройства робота-манипулятора // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 172–179. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-172-179

Аннотация

Цель: определение и анализ основных передаточных характеристик типовой схемы рычажного механизма захватного устройства робота-манипулятора. **Методы:** проведен кинематический анализ аналитическим и графоаналитическим методами, а также динамический анализ с использованием принципа возможных скоростей в статическом режиме, составлено общее уравнение динамики механизма в режиме вращения вокруг главной центральной оси инерции. **Результаты:** установлены зависимости передаточных характеристик механизма от его геометрических параметров и зависимость допустимого угла давления в поступательной кинематической паре механизма от геометрических параметров схемы механизма. Получена зависимость усилия на зажиме захватного устройства от силы на штоке гидроцилиндра. **Практическая значимость:** результаты кинематического анализа могут быть применены для синтеза более совершенного механизма по условию допустимых углов давления, а также для более углубленного расчета параметров взаимодействия захватного устройства с объектом манипулирования. Результаты силового расчета применимы для расчета параметров силового гидроцилиндра, отвечающего заданной грузоподъемности робота.

Ключевые слова: манипуляционный робот, захватное устройство, кинематический анализ, схват, динамический анализ, силовое передаточное отношение, кинематическое передаточное отношение

Устройство промышленных роботов

Роботизация прочно заняла приоритетное место в национальном технологическом развитии. Роботы широко применяются во всех отраслях, включая машиностроение, фармацевтическую, аграрную и пищевую промышленность, складскую логистику, энергетику, нефтегазовый сектор и пр. В связи с этим разработка новых методов расчета, а также совершенствование уже применяющихся конструкций элементов робототехнических систем остаются актуальными задачами.

Промышленные роботы (ПР) относятся к классу манипуляционных робототехнических систем, которые применяются для авто-

матизации технологических процессов [1]. ПР оснащаются захватными устройствами для захватывания и удержания объектов манипулирования.

В качестве силовых приводов механических захватных устройств применяются гидравлические, пневматические цилиндры, развивающие на штоке усилие \bar{F} . Одними из основных характеристик конструкции захватного устройства являются силовое передаточное отношение k_F и кинематическое передаточное отношение k_V [2].

По принципу действия захватные устройства (ЗУ) подразделяются на механические, электромагнитные, вакуумные, удерживающие

при помощи сил электростатического притяжения, адгезии, с липкими накладками и др.

По способу удержания объекта хватные устройства подразделяются на схватывающие, поддерживающие и удерживающие. Схватывающие хватные устройства удерживают объект при помощи запирающих усилий и сил трения рабочих органов (губок, пальцев) [1–3].

На рис. 1 представлена принципиальная схема схватывающего хватного устройства. Хватное устройство рычажного типа состоит из силового гидроцилиндра (1), который через тягу (2) передает усилие одновременно на два скользящих элемента (3). Скользящие элементы (3) перемещаются по направляющим (4), жестко связанным с губками захвата (5).

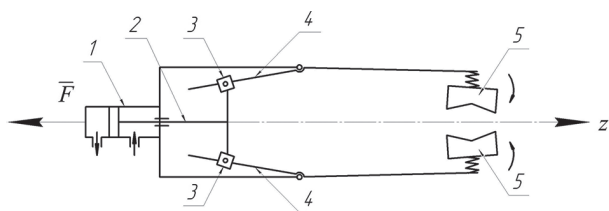


Рис. 1. Принципиальная схема механического хвата робота-манипулятора

Кинематический анализ схемы хватного устройства робота-манипулятора

Кинематическая схема рычажного механизма ЗУ представлена на рис. 2. Под действием усилия, развиваемого на штоке гидроцилиндра, тяга движется поступательно со скоростью \bar{V}_E . Поступательное движение от тяги передается симметричным кулисным камням C, C_1 , которые, участвуя в сложном движении, сообщают вращательные движения звеньям COB и $C_1O_1B_1$ соответственно. Звенья COB и $C_1O_1B_1$ реализуют хватное движение [4].

Найдем зависимости скоростей точек C, B от скорости на штоке гидроцилиндра \bar{V}_E (рис. 2). Рассмотрим цикл захвата детали. Механизм ЗУ манипулятора симметричен относительно оси Ez , кинематический анализ проведем только для одной части механизма [5].

Кулисный камень C движется в относительном движении по направляющей CO со скоростью \bar{V}_{Cr} , в переносном движении — вместе со звеном COB участвует во вращательном движении вокруг точки O со скоростью \bar{V}_{Ce} . Абсолютную скорость кулисного камня C найдем

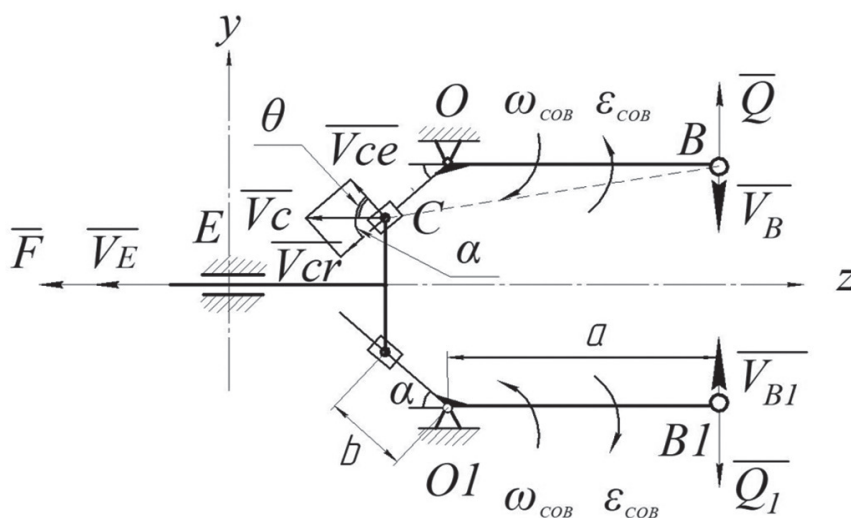


Рис. 2. Кинематическая схема ЗУ робота-манипулятора

как геометрическую сумму относительной и переносной скоростей:

$$\vec{V}_C = \vec{V}_{Ce} + \vec{V}_{Cr}. \quad (1)$$

Спроецируем выражение (1) на ось Ey :

$$0 = -V_{Cr} \sin(\alpha) + V_{Ce} \cos(\alpha) \quad (2)$$

и на ось Ez :

$$V_C = V_{Ce} \sin(\alpha) + V_{Cr} \cos(\alpha). \quad (3)$$

Выразим относительную и переносную скорости кулисного камня C через абсолютную скорость \vec{V}_C . Абсолютная скорость \vec{V}_C равна скорости точки E штока гидроцилиндра $\vec{V}_C = \vec{V}_E$ (рис. 2). Совместно решая (1)–(3), получим переносную скорость:

$$V_{Ce} = V_{Cr} \operatorname{tg}(\alpha) = V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)$$

и относительную скорость:

$$V_{Cr} = V_C \cdot \cos(\alpha) = V_E \cdot \cos(\alpha).$$

Найдем угловую скорость звена COB :

$$\omega_{COB} = \frac{V_{Ce}}{b} = \frac{V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}{b}.$$

Скорость точки B равна:

$$V_B = \omega_{COB} \cdot a = \frac{V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b}.$$

Кинематическое передаточное отношение захватного устройства:

$$k_v = \frac{V_E}{V_B} = \frac{b}{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}, \quad (4)$$

где a — расстояние от стойки O до линии действия силы сжатия детали захватным устройством; b — расстояние от стойки O до кулисного камня C в текущем положении; α — угол между участками CO и OB звена COB (рис. 2).

Проиллюстрируем кинематику ЗУ манипулятора планом скоростей и ускорений для

положения, представленного на рис. 2. Длины звеньев, угловая скорость, угловое ускорение звена COB и скорость штока гидроцилиндра \vec{V}_E считаются заданными [2–4].

Скорость кулисного камня C найдем согласно векторному выражению (1) с учетом того, что его абсолютная скорость направлена вдоль оси Ez .

Точка B имеет вращательную скорость относительно центра O , вместе с этим скорость точки B можно найти как векторную сумму абсолютной скорости кулисного камня \vec{V}_C и вращательной скорости точки B по отношению к кулисному камню C :

$$\begin{cases} \vec{V}_B = \vec{V}_O + \vec{V}_{BO} \\ \vec{V}_B = \vec{V}_C + \vec{V}_{BC} \end{cases}. \quad (5)$$

План ускорений механизма ЗУ строится через составление и графическое решение следующих систем векторных уравнений:

$$\begin{cases} \vec{a}_{C1} = \vec{a}_O + \vec{a}_{C1O}^n + \vec{a}_{C1O}^r, \\ \vec{a}_C = \vec{a}_{C1} + \vec{a}_C^{kop} + \vec{a}_{C34}^r, \\ \vec{a}_B = \vec{a}_O + \vec{a}_{BO}^n + \vec{a}_{BO}^r, \\ \vec{a}_B = \vec{a}_C + \vec{a}_{BC}^n + \vec{a}_{BC}^r \end{cases}, \quad (6)$$

где $C1$ — точка на направляющей (4) захватного устройства, совпадающая в данный момент с кулисным камнем; \vec{a}_{C34}^r — относительное ускорение кулисного камня C по отношению к тяге (4); \vec{a}_{C34}^{kop} — ускорение Кориолиса (рис. 2 и 3).

Планы скоростей и ускорений ЗУ манипулятора представлены на рис. 3.

Силовой расчет ЗУ робота-манипулятора в статическом режиме

Проведем силовой расчет по определению усилий \vec{Q} и \vec{Q}_1 на зажимах ЗУ манипулятора в случае статического удержания детали. Губки B и B_1 приняты за материальные точки.

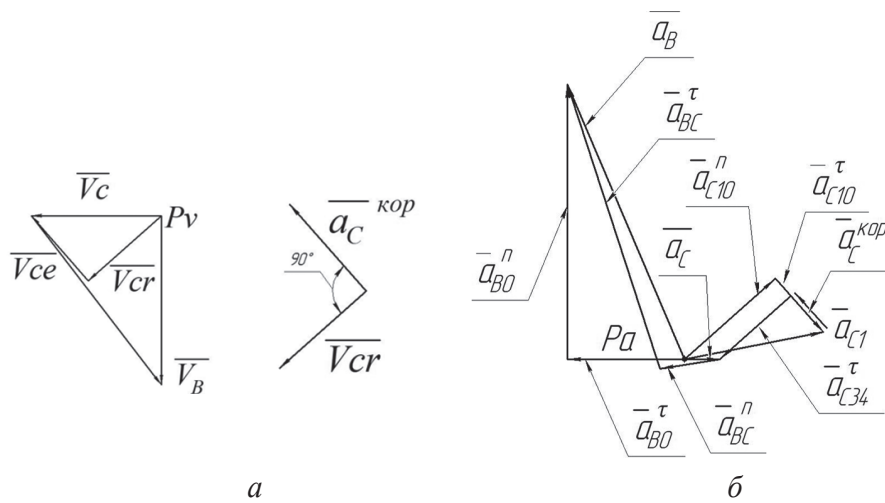


Рис. 3: а — план скоростей, б — план ускорений захватного устройства

Используем принцип возможных скоростей и составим уравнение в форме суммы мощностей:

$$\sum \bar{P}_i \cdot \bar{V}_i = 0 \quad (7)$$

или

$$\sum P_i \cdot V_i \cdot \cos(\bar{P}_i, \bar{V}_i) = 0.$$

На рис. 2 показаны возможные скорости и активные силы, действующие в механизме.

Силы тяжести не входят в уравнение суммы мощностей, поскольку действуют перпендикулярно направлению возможных скоростей [2–4].

Уравнение мощностей запишется так:

$$F \cdot V_E - Q \cdot V_B - Q_1 \cdot V_{B1} = 0, \quad (8)$$

где \bar{F} — усилие, развиваемое на штоке гидроцилиндра; Q , Q_1 — силы сжатия детали губками B и B_1 захватного устройства.

$$F \cdot V_E - Q \cdot \frac{V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b} - Q_1 \cdot \frac{V_E \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b} = 0,$$

$$F = 2 \cdot Q \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot a}{b}.$$

Силовое передаточное отношение ЗУ робота-манипулятора:

$$k_F = \frac{Q}{F} = \frac{b}{2 \cdot a \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}, \quad (9)$$

где a — расстояние от стойки O до линии действия силы сжатия детали захватным устройством; b — расстояние от стойки O до кулисного камня C в текущем положении (рис. 2).

Зависимости кинематического передаточного отношения k_V и силового передаточного отношения k_F механизма схвата от соотношения длин участков звена COB ($\lambda = CO/OB = b/a = 0,1 \dots 2$) приведены на рис. 4. Зависимости получены при фиксированных углах α между участками CO и OB : передаточные отношения k_{V1} , k_{F1} — при угле $\alpha = 30^\circ$, передаточные отношения k_{V2} , k_{F2} — при угле $\alpha = 45^\circ$, передаточные отношения k_{V3} , k_{F3} — при угле $\alpha = 60^\circ$.

Из рис. 4 следует, что при увеличении соотношения длин $\lambda = b/a = 0,1 \dots 1,5 \dots 2$ передаточные коэффициенты скорости и силы возрастают. Длины звеньев могут лимитироваться по условиям их инерционности и реализации конкретных задач в ограниченном

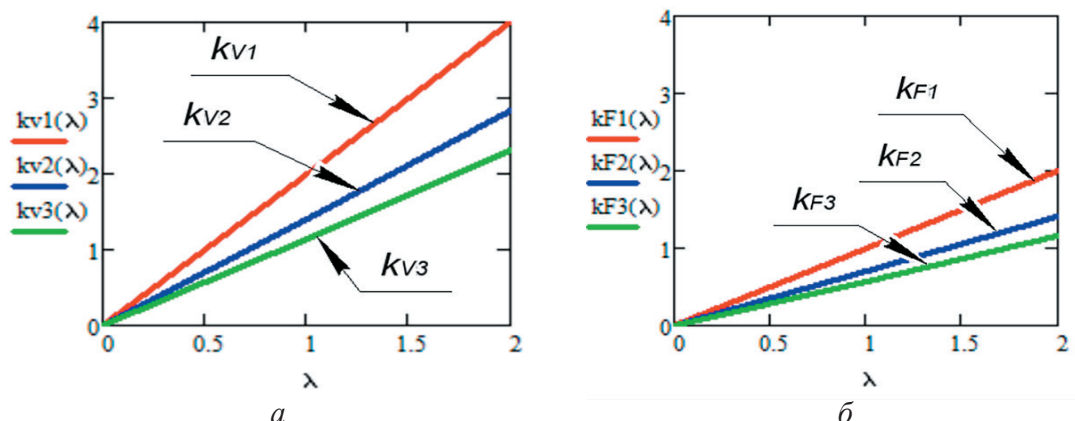


Рис. 4. Зависимость передаточных отношений от соотношения длин звеньев захватного устройства $\lambda = b/a$: a — кинематического, b — силового

пространстве, а также по силовым характеристикам привода. При этом угол α , определяющий наклон направляющей кулисного камня (4) к горизонтали, является обратным для угла давления $\theta = 90^\circ - \alpha$ в поступательной кинематической паре C .

С уменьшением угла α возрастает угол давления θ , что приводит к ухудшению условий работы кинематической пары «кулиса — кулисный камень». Наилучшие условия движения кулисного камня из рассмотренных при расчете зависимостей кинематических и силовых передаточных отношений будут при $\alpha = 60^\circ$ (рис. 4) [2–4].

Силовой расчет схемы схвата роботоманипулятора в динамическом режиме

Определим зависимость усилий на зажимах захватного устройства \bar{Q} , \bar{Q}_1 , вращающегося с постоянной угловой скоростью вокруг главной центральной оси инерции Ez , от силы на штоке гидроцилиндра \bar{F} и угловой скорости ω . Применим принцип Даламбера и составим общее уравнение динамики. Так как схват представляет собой симметричный механизм, рассмотрим только одну его часть (рис. 5).

Схват вращается с постоянной угловой скоростью, на его звенья действуют только центробежные силы инерции. Центробежная сила инерции, приложенная в точке B :

$$\bar{\Phi}_B = -m_B \cdot \bar{a}_B^y.$$

Равнодействующая центробежных сил инерции участка BO , приложенная к его центру масс:

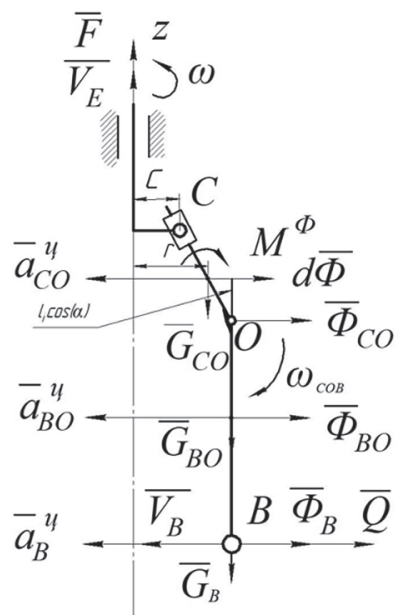


Рис. 5. Распределение внешних сил и сил инерции, действующих на механизм ЗУ

$$\bar{\Phi}_{BO} = -m_{BO} \cdot \bar{a}_{BO}^u,$$

Центробежную силу инерции участка CO приведем к точке O . В результате получим главный вектор сил инерции $\bar{\Phi}_{CO}$ и главный момент \bar{M}^Φ сил инерции относительно центра O (10), где $l_i \cos(\alpha)$ — плечо силы инерции участка CO длиной l_i , $d\Phi$ — элементарная центробежная сила инерции (рис. 6) [6].

$$\bar{\Phi}_{CO} = -m_{CO} \cdot \bar{a}_{CO}^u,$$

$$M^\Phi = \int_0^b l_i \cos(\alpha) \cdot d\Phi \quad (10)$$

$$d\Phi = a_{CO}^u \cdot dm_{CO} = \omega^2 r \cdot dm_{CO},$$

$$dm_{CO} = \gamma \cdot dl_i, \quad (11)$$

где r — радиус траектории, по которой движется элементарный участок стержня dl_i ; dm_{CO} — масса элементарного участка стержня dl_i ; γ — погонная масса стержня.

В итоге момент силы инерции M^Φ относительно центра приведения O запишется как:

$$\begin{aligned} M^\Phi &= \int_0^b l_i \cos(\alpha) \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \gamma \cdot dl_i = \\ &= \omega^2 \cdot m_{CO} \cdot \cos(\alpha) \cdot b \cdot \left(\frac{c}{2} + \frac{b \cdot \sin(\alpha)}{6} \right), \quad (12) \end{aligned}$$

где $r = c + b \sin(\alpha) - l_i \sin(\alpha)$.

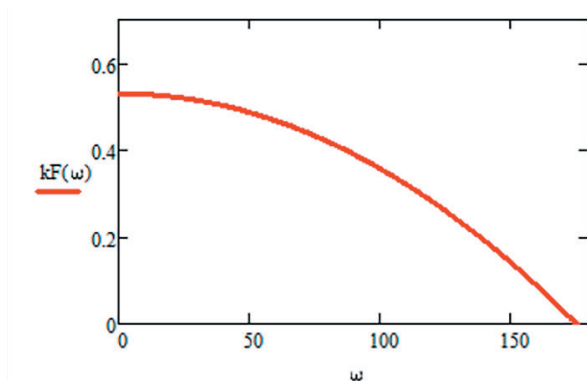


Рис. 6. Зависимость силового передаточного отношения захватного устройства от угловой скорости вращения

Общее уравнение динамики запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{F}{2} \cdot V_E + M^\Phi \cdot \omega_{BOC} - \Phi_1 \cdot \frac{a}{2} \cdot \omega_{BOC} - \\ - (\Phi_B + Q) \cdot a \cdot \omega_{BOC} - G_{CO} \cdot \frac{b}{2} \sin(\alpha) \cdot \omega_{BOC} = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

где $\frac{F}{2}$ — модуль силы на штоке гидроцилиндра, отнесенный к одной половине механизма захватного устройства.

Зависимость усилия на зажиме захватного устройства \bar{Q} от силы на штоке гидроцилиндра \bar{F} и угловой скорости ω , полученная при следующих исходных данных захватного устройства: $a = 8$ см, $b = 6$ см, $c = 4$ см, $\alpha = 45^\circ$, $m_{BO} = 0,2$ кг, $m_{CO} = 0,4$ кг, $m_B = 0,18$ кг, запишется в виде:

$$Q = 0,53F - 1,73 \cdot \omega^2 - 1,04. \quad (14)$$

Силовое передаточное отношение в динамическом режиме:

$$k_F = \frac{Q}{F} = \frac{0,53F - 1,73 \cdot \omega^2 - 1,04}{F}. \quad (15)$$

Выводы

1. В статье приведен кинематический и силовой расчет механизма захватного устройства робота-манипулятора кулисного типа. Получены кинематическое передаточное отношение и силовое передаточное отношение механизма захватного устройства в статическом режиме (в режиме удержания детали).

2. Установлено, что для данной конструкции захватного устройства увеличение угла наклона кулисы α исполнительного звена захвата приводит к уменьшению угла давления, что делает движение поступательной кинематической пары «кулиса — кулисный камень» более плавным и надежным. При этом кинематическое и силовое

передаточные отношения незначительно снижаются.

3. Проведен силовой расчет захватного устройства в динамическом режиме работы — в режиме удержания детали и вращения вместе с ней вокруг главной центральной оси инерции. Получена зависимость силового передаточного отношения захватного устройства манипулятора от угловой скорости в динамическом режиме.

4. Показано, что необходимое усилие на штоке гидроцилиндра для удержания детали при вращении захватного устройства существенно зависит от центробежной силы инерции, которая, в свою очередь, зависит от квадрата угловой скорости ЗУ. При некотором значении угловой скорости силовое передаточное отношение может оказаться равным нулю.

Список источников:

1. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2016. 311 с.

2. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1998. Кн. 1: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. 300 с.

3. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1998. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. 366 с.

4. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1998. Кн. 3: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. 380 с.

5. Челпанов И.Б. Устройство промышленных роботов: учеб. для техникумов и колледжей. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2001. 203 с.

6. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: учеб. и практикум для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2025. 432 с.

Дата поступления: 26.11.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

Контактная информация:

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

Dynamic analysis of a robotic manipulator gripper

E. V. Oparina

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

For citation: *Oparina E. V. Dynamic Analysis of a Robotic Manipulator Gripper // Proceedings of Petersburg Transport University. St. Petersburg: PGUPS, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 172–179. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-172-179. (In Russian)*

Abstract

Objective: to identify and analyze the main transmission characteristics of a typical linkage mechanism used in the gripper of a robotic manipulator. **Methods:** the mechanism was investigated kinematically

through both analytical and combined graphical-analytical analysis. Its dynamic behaviour was also evaluated under static conditions based on the principle of virtual velocities. In addition, a general equation of the mechanism's dynamics was derived for motion involving rotation around the principal central axis of inertia. **Results:** relationships between the mechanism's transmission characteristics and its geometric parameters have been determined. The dependence of the permissible pressure angle in the mechanism's translational kinematic pair on the geometric parameters of the mechanism's configuration has been established. A functional relationship has also been obtained between the gripping force of the gripper and the force exerted on the hydraulic cylinder rod. **Practical significance:** the results of the kinematic analysis may be applied to synthesize a more advanced mechanism based on the criterion of permissible pressure angles. The findings can likewise support a more precise evaluation of the interaction between the gripper and the object being manipulated. The results of the force calculation are applicable to determining the parameters of the hydraulic power cylinder required to satisfy the robot's specified load-carrying capacity.

Keywords: robotic manipulator, gripper, kinematic analysis, grip, dynamic analysis, force transmission ratio, kinematic transmission ratio

References

1. Kozyrev Yu.G. Zakhvatnye ustrojstva i instrumenty promyshlennykh robotov: ucheb. posobie. M.: KNORUS, 2016. 311 s. (In Russian)
2. Mekhanika promyshlennykh robotov: ucheb. posobie dlya vuzov: v 3 kn. / pod red. K.V. Frolova, E.I. Vorob'eva. M.: Vyssh. shk., 1998. Kn. 1: Raschyot i proektirovanie mekhanizmov / E.I. Vorob'ev, O.D. Egorov, S.A. Popov. 300 s. (In Russian)
3. Mekhanika promyshlennykh robotov: ucheb. posobie dlya vuzov: v 3 kn. / pod red. K.V. Frolova, E.I. Vorob'eva. M.: Vyssh. shk., 1998. Kn. 1: Raschyot i proektirovanie mekhanizmov / E.I. Vorob'ev, O.D. Egorov, S.A. Popov. 366 s. (In Russian)
4. Mekhanika promyshlennykh robotov: ucheb. posobie dlya vuzov: v 3 kn. / pod red. K.V. Frolova, E.I. Vorob'eva. M.: Vyssh. shk., 1998. Kn. 1: Raschyot i proektirovanie mekhanizmov / E.I. Vorob'ev, O.D. Egorov, S.A. Popov. 380 s. (In Russian)
5. Chelpanov I.B. Ustrojstvo promyshlennykh robotov: ucheb. dlya tekhnikumov i kolledzhej, 2-e izd., pererab. i dop. SPb.: Politehnika, 2001. 203 s. (In Russian)
6. Timofeev G.A. Teoriya mekhanizmov i mashin: ucheb. i praktikum dlya vuzov. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Yurajt, 2025. 432 s. (In Russian)

Received: 26.11.2025

Accepted: 19.01.2026

Author's information:

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

УДК 692.6

К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 3 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями с припазовкой)

М. Д. Вебер¹, А. В. Кузнецов²

¹ООО «Инфорспроект», Россия, 115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, 19

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

Для цитирования: Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 3 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями с припазовкой) // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 180–189. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-180-189

Аннотация

Цель: привести дополнительные примеры проведения поверочных расчетов каменных бескосоурных лестниц в процессе обследований их технического состояния. **Материалы и методы:** в примерах использованы математический аппарат и данные, отобранные в рамках предыдущих исследований. **Результаты:** проиллюстрированы отличительные аспекты выбранных примеров. Выполнены анализ и интерпретация полученных результатов с учетом последующего применения на реальных объектах. **Практическая значимость:** предоставление практикующим инженерам расчетных инструментов для оценки технического состояния ценных исторических конструкций.

Ключевые слова: каменные конструкции, бескосоурные лестницы, висячие лестницы, обследование, реконструкция, реставрация, поверочные расчеты, примеры расчета

Введение

Представленная статья является заключительной частью предыдущих двух работ [1, 2]. Рассматривается вариант прямого лестничного марша с припазованными ступенями. Для расчета приняты характеристики природного камня, сведения о котором подробно изложены в [1, 2].

Рассмотрим марш (рис. 1), характеристики которого аналогичны предыдущему примеру [2], за исключением сечения ступеней. Параметры ступеней приведены в табл. 1.

Физико-механические свойства путиловского известняка с учетом указанных ранее [2] предпосылок сведем в табл. 2.

Действующие нагрузки сведем в табл. 3.1 и 3.2. Собственный вес ступеней с учетом паза отличается от предыдущего примера [2].

С учетом гипотезы Хеймана [7], оценка прочности ступеней при их работе на изгиб осуществляется следующим образом (рис. 4):

1. Определим момент сопротивления сечения ступени при изгибе в модуле «Консул» пакета SCAD Office (учитывая паз и валик):

$$W_{\text{изг.}} = 1002,3 \text{ см}^3.$$

2. Определим максимальный изгибающий момент:

$$M = \frac{q_{\text{ноз.р.}} \cdot L^2}{2} + M_{\text{оср.р.}} + W_{\text{оср.р.}} \cdot L_1 = \frac{2,54 \cdot 1,0^2}{2} + 0,35 + 0,18 \cdot 0,9 = 1,782 \text{ кН} \cdot \text{м} = 18166 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

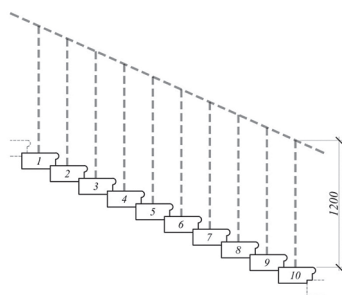


Рис. 1. Продольная схема марша

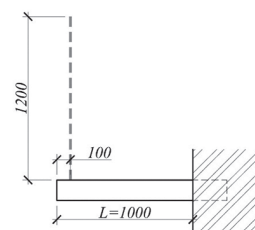


Рис. 2. Поперечная схема марша

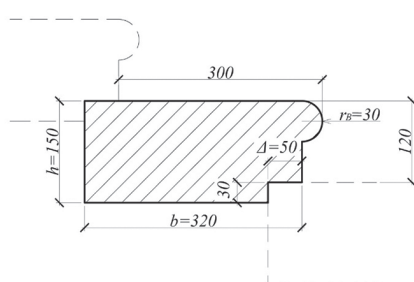


Рис. 3. Сечение ступени

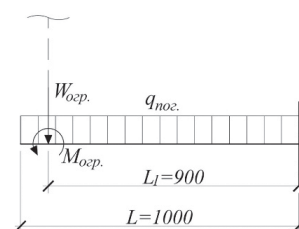


Рис. 4. Расчетная схема ступени для расчета на изгиб

ТАБЛИЦА 1. Параметры ступеней в марше

Параметр	Значение
Материал ступеней	Путиловский известняк
Число ступеней	$n = 10$ шт.
Ширина марша (вынос консоли, рис. 2)	$L = 1000$ мм (1,0 м)
Тип сечения ступеней (рис. 3)	Прямоугольное, с пазами в нижней части
Ширина ступени без учета валика	$b = 320$ мм (0,32 м)
Высота ступени	$h = 150$ мм (0,15 м)
Тип паза	Прямоугольный 50 (ширина) \times 30 (высота) мм

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические свойства путиловского известняка, принятые в расчет

Показатель	Значение	Источник
Плотность	2800 кг/м ³	[3]
Временное сопротивление сжатию в сухом виде	$\sigma_{сж} = 91,9$ МПа	[4, с. 45, 66] [5, с. 89]
Временное сопротивление растяжению	$\sigma_p = 3,06$ МПа	[5, с. 112]
Временное сопротивление изгибу	$\sigma_{из} = 15,31$ МПа	[5, с. 112]
Модуль упругости	$E = 17167,5$ МПа = 175 000 кг/см ²	[2]
Коэффициент Пуассона	$\nu = 0,32$	[2]
Модуль сдвига	$G = E / (2(1 + \nu)) = 6502,84$ МПа = 66 287 кг/см ²	[2]

ТАБЛИЦА 3.1. Значения отдельных нагрузок

Тип нагрузки	Нормативное значение	Коэффициент надежности по нагрузке, γ_f	Расчетное значение
Вертикальная равномерно-распределенная кратковременная на поверхность ступени	3,0 кПа [6, табл. 8.3 п. 12а]	1,2 [6, п. 8.2.7]	3,6 кПа
Вертикальная кратковременная (приведенная погонная для расчета на изгиб)	$q_{\text{пог.вр.н}} = 0,3$ (ширина приложения) $\times 3,0 = 0,9$ кН·м	1,2 [6, п. 8.2.7]	$q_{\text{пог.вр.р}} = 0,3$ (ширина приложения) $\times 3,6 = 1,08$ кН·м
Вертикальная кратковременная (приведенная сосредоточенная для расчета на кручение)	$P_{i.n} = 0,3$ (площадь приложения) $\times 3,0 = 0,9$ кН	1,2 [6, п. 8.2.7]	$P_i = 0,3$ (площадь приложения) $\times 3,6 = 1,08$ кН
Горизонтальная равномерно-распределенная кратковременная на ограждение	0,8 кН/м [6, п. 8.2.6в]	1,2 [6, п. 8.2.7]	0,96 кПа
Момент в точке крепления ограждения (приведенный сосредоточенный для расчета на изгиб)	$M_{\text{огр.н}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 1,2$ (плечо приложения нагрузки, равное высоте ограждения) $\times 0,8 = 0,29$ кН·м	1,2 [6, п. 8.2.7]	$M_{\text{огр.р}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 1,2$ (плечо приложения нагрузки, равное высоте ограждения) $\times 0,96 = 0,35$ кН·м
Примечание. Площадь сечения ступени: $0,32$ (ширина b) $\times 0,15$ (высота h) $+ 1/2 \times \pi \times 0,03^2$ (площадь валика) $- 0,05 \times 0,03$ (площадь паза) $= 0,048$ м ² .			
Собственный вес ступени (погонный для расчета на изгиб)	$q_{\text{пог.ст.н}} = 0,048 \times 2800$ (плотность материала) $= 134,4$ кг/м $= 1,32$ кН·м	1,1 [6, табл. 7.1]	$q_{\text{пог.ст.р}} = 1,46$ кН·м
Собственный вес ступени (сосредоточенный для расчета на кручение)	$W_{\text{ст.н}} = 0,048 \times 2800$ (плотность материала) $\times 1,0$ (вынос консоли L) $= 134,4$ кг $= 1,32$ кН	1,1 [6, табл. 7.1]	$W_{\text{ст.р}} = 1,46$ кН
Собственный вес ограждения	0,5 кН/м	1,2 [6, табл. 7.1]	0,6 кН·м
Собственный вес ограждения (сосредоточенный для расчета на изгиб и кручение)	$W_{\text{огр.н}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 0,5 = 0,15$ кН	1,2 [6, табл. 7.1]	$W_{\text{огр.р}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 0,6 = 0,18$ кН

ТАБЛИЦА 3.2. Значения суммарных нагрузок

Вид деформации	Проверяемое условие	Прикладываемые нагрузки (нормативные)	Прикладываемые нагрузки (расчетные)
Изгиб	Прочность ступени	—	<ul style="list-style-type: none"> – равномерно распределенная по всей длине консоли $q_{\text{пог.р}} = q_{\text{пог.вр.р}} + q_{\text{пог.ст.р}} = 1,08 + 1,46 = 2,54$ кН·м; – сосредоточенный момент на расстоянии 0,1 м от конца консоли $M_{\text{огр.р}} = 0,35$ кН·м; – сосредоточенная вертикальная сила на расстоянии 0,1 м от конца консоли, (то есть с плечом от места заделки $L_1 = 1,0 - 0,1 = 0,9$ м): $W_{\text{огр.р}} = 0,18$ кН

Изгиб	Деформативность ступени	– равномерно распределенная по всей длине консоли: $q_{\text{пог.н}} = q_{\text{пог.вр.н}} + q_{\text{пог.ст.н}} = 0,9 + 1,32 = 2,22 \text{ кН}\cdot\text{м} = 2,27 \text{ кг}\cdot\text{см}$; – сосредоточенный момент на расстоянии 0,1 м от конца консоли: $M_{\text{огр.н}} = 0,29 \text{ кН}\cdot\text{м} = 2957 \text{ кг}\cdot\text{см}$; – сосредоточенная вертикальная сила на расстоянии 0,1 м от конца консоли, (то есть с плечом от места заделки $L_1 = 1,0 - 0,1 = 0,9 \text{ м}$): $W_{\text{огр.н}} = 0,15 \text{ кН} = 15,3 \text{ кг}$	—
Кручение	Прочность ступени	—	– сосредоточенная в центре ступени: $P_1 = 1,08 \text{ кН}$; – сосредоточенная в центре ступени: $W = W_{\text{огр.п}} + W_{\text{ст.п}} = 0,18 + 1,46 = 1,64 \text{ кН}$
Кручение	Деформативность ступени	– сосредоточенная в центре ступени $P_{1н} = 0,9 \text{ кН}$; – сосредоточенная в центре ступени: $W_н = W_{\text{огр.н}} + W_{\text{ст.н}} = 0,15 + 1,32 = 1,47 \text{ кН}$	—

3. Определим максимальное нормальное напряжение изгиба:

$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{изг}}} = \frac{18166}{1002,3} = 18,13 \text{ кг/см}^2 = 1,78 \text{ МПа}.$$

4. Определим коэффициент запаса:

$$k = \frac{\sigma_{\text{изг}}}{\sigma} = \frac{15,31}{1,78} = 8,6.$$

Таким образом, вычисленное значение коэффициента запаса 8,6 превышает рекомендованное значение, для которого $k = 3$. Следовательно, расчетное значение обеспечивает требуемую прочность ступени при восприятии нагрузок от изгибающих моментов.

Расчет деформации ступеней при их работе на изгиб осуществим следующим образом.

1. Момент инерции при изгибе рассчитывается в модуле «Консул» пакета SCAD Office (учитывая паз и валик):

$$I_{\text{изг}} = 8560,06 \text{ см}^4.$$

2. Для вычисления наибольших вертикальных перемещений воспользуемся принципом суперпозиции отдельных перемещений:

• при приложении на всей протяженности ступени равномерно распределенной нагрузки прогиб будет равен:

$$f_1 = \frac{q_{\text{пог.н}} \cdot L^4}{8EI_{\text{изг}}} = \frac{2,27 \cdot 100^4}{8 \cdot 175000 \cdot 8560,06} = 0,019 \text{ см};$$

• нагрузка от горизонтальной силы, приложенной к ограждению, передается в точках креплений на расстоянии 0,1 м от конца ступени в виде сосредоточенного момента и дает:

$$f_2 = \frac{M_{\text{огр.н}} \cdot L_1(2L - L_1)}{2EI_{\text{изг}}} = \frac{2957 \cdot 90 \cdot ((2 \cdot 100) - 90)}{2 \cdot 175000 \cdot 8560,06} = 0,01 \text{ см};$$

• нагрузка от собственного веса ограждения передается в точках крепления ограждения на расстоянии 0,1 м от конца ступени в виде сосредоточенной силы и дает:

$$f_3 = \frac{W_{\text{огр.н}} \cdot L_1^2(3L - L_1)}{6EI_{\text{изг}}} = \frac{15,3 \cdot 90^2 \cdot ((3 \cdot 100) - 90)}{6 \cdot 175000 \cdot 8560,06} = 0,003 \text{ см};$$

• просуммировав полученные значения, получаем общее вертикальное перемещение (прогиб):

$$f_{\text{max}} = f_1 + f_2 + f_3 = 0,019 + 0,01 + 0,003 = 0,032 \text{ см}.$$

3. По требованиям СП 20.13330.2016 [6, пп. 2а, 3 и примечание 1 табл. Д. 1] допустимый прогиб для элементов лестниц составит:

$$f_u = 2L / 120 = 2 \cdot 100 / 120 = 1,66 \text{ см}.$$

Вычисленное значение значительно превышает величину максимального прогиба

$f_{\max} = 0,032$ см. Следовательно, полученное значение при расчете на деформации ступеней при изгибе обеспечивает требуемую прочность и соответствует требованиям действующих норм.

С учетом гипотезы Ф. Литтла для ступеней с припазовкой [8] (рис. 5) проверка прочности ступеней на кручение осуществляется следующим образом.

Коэффициент c принимаем аналогично предыдущему примеру [2] $c = 0,85$.

Формулы для вертикальных реакций R_n и R_{Wn} для припазованных ступеней идентичны формулам для плоских ступеней.

1. Определим крутящий момент в заделке нижней ступени:

$$T_n = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i + (n-1) \cdot W \right)}{c} + \frac{(P_n + W)}{2c} \right] \cdot \frac{b}{2} - H \cdot h,$$

где H — это расчетное значение общего распора от марша.

Для определения декремента $H \cdot h$ необходимо вычислить крутящие моменты во всех ступенях марша, как для плоских (неприпазованных ступеней), по формуле:

$$T_n = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{i-1} P_i + (i-1) \cdot W \right)}{c} + \frac{(P_i + W)}{2c} \right] \cdot \frac{b}{2}.$$

Декремент $H \cdot h$ равен среднему арифметическому значению крутящих моментов в ступенях: $H \cdot h = T_{\text{ave}}$.

Примечание: расчетное значение распора от марша, действующего на лестничные площадки, определяются по формуле:

$$H = \frac{T_{\text{ave}}}{h} = \frac{2,56}{0,15} = 17,07 \text{ кН.}$$

Результаты вычислений для удобства сведен в табл. 4.

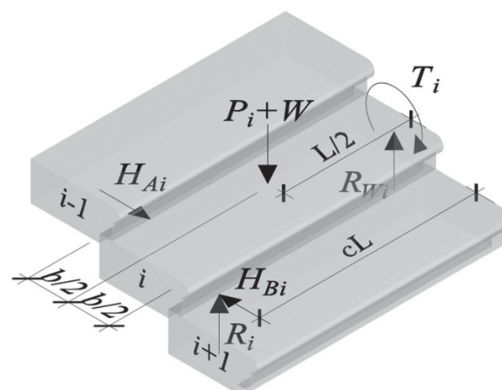


Рис. 5. Схема припазованной ступени при расчете на кручение

ТАБЛИЦА 4. Расчет усредненного момента кручения (от расчетных нагрузок).

Номер ступени (сверху вниз)	Крутящий момент	
	T_i , кН·м	T_i , кг·см
1	0,256	2610
2	0,768	7829
3	1,280	13 048
4	1,792	18 267
5	2,304	23 486
6	2,816	28 705
7	3,328	33 925
8	3,840	39 144
9	4,352	44 363
10	4,864	49 582
Усредненный крутящий момент T_{ave}	2,560	26096

Таким образом,

$$T_n = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i + (n-1) \cdot W \right)}{c} + \frac{(P_n + W)}{2c} \right] \cdot \frac{b}{2} - H \cdot h =$$

$$= \left[\frac{\left((10-1) \cdot 1,08 + (10-1) \cdot 1,64 \right)}{0,85} + \frac{(1,08 + 1,64)}{2 \cdot 0,85} \right] \cdot \frac{0,32}{2} -$$

$$- 2,56 = 2,31 \text{ кН} \cdot \text{м} = 23548 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

2. При определении момента сопротивления сечения ступени при кручении в модуле «Консул» пакета SCAD Office с учетом паза значение получается больше, чем полученное по аналитическим формулам без паза (см. предыдущий пример [2]), поэтому примем консервативно:

$$W_k = 1798,87 \text{ см}^3.$$

3. Определим значение максимального касательного напряжения от кручения, возникающего в наиболее опасной зоне — посередине верхней поверхности ступени:

$$\tau = \frac{T_n}{W_k} = \frac{23548}{1798,97} = 13,1 \text{ кг/см}^2 = 1,29 \text{ МПа}.$$

4. В соответствии с методикой, изложенной в приложении 2 ГОСТ 21153.8-88 [9], составим расчетным способом паспорт прочности материала ступеней. Это позволит определить допустимое соотношение касательных и нормальных напряжений в наиболее опасной точке сечения.

• Определяем соотношение безразмерных радиусов предельных кругов Мора q_2 и q_1 :

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} = \frac{91,9}{3,06} = 30;$$

• $K_1 + q_1$, а также q_2 необходимо выписать из таблицы, приведенной в ГОСТ 21153.8-88 [9, табл. 3]:

$$q_2 = 0,0363; K_1 + q_1 = 0,0024;$$

• после выяснения формы огибающей a :

$$a = \sigma_{сж} / 2q_2 = 91,9 / (2 \cdot 0,0363) = 1265,84 \text{ МПа};$$

• необходимо рассчитать параметр переноса начала координат σ_0 :

$$\sigma_0 = a (K_1 + q_1) = 1265,84 \cdot 0,0024 = 3,04 \text{ МПа};$$

• на основании полученного параметра переноса можно определить безразмерную координату K для нашего напряжения изгиба:

$$K = (\sigma + \sigma_0) / a = (-1,78 + 3,04) / 1265,84 = 0,00095;$$

• получив K , можно рассчитать безразмерную координату l :

$$l = 0,73 \cdot \left(\frac{K^2}{K^2 + 1} \right)^{\frac{3}{8}} = 0,73 \cdot \left(\frac{0,00095^2}{0,00095^2 + 1} \right)^{\frac{3}{8}} = 0,00395;$$

• допустимое касательное напряжение для заданного нормального напряжения можно вычислить по следующей формуле:

$$\tau_{пред.} = l \cdot a = 0,00395 \cdot 1265,84 = 5,00 \text{ МПа}.$$

5. Определим коэффициент запаса:

$k = \tau_{пред.} / \tau = 5,00 / 1,29 = 3,87$, что больше рекомендованного $k = 3$, то есть прочность ступени достаточна для восприятия крутящих нагрузок.

Проведем оценку деформативности при кручении в соответствии с предпосылками Ф. Литгла для припазованных ступеней [8].

1. Определим момент инерции сечения ступени при кручении в модуле «Консул» пакета SCAD Office (учитывая паз и валик):

$$I_k = 24092,9 \text{ см}^4.$$

2. Для припазованных ступеней максимальное вертикальное перемещение $\delta_{(v)}$ имеет место в середине пролета марша, поэтому перемещения ступеней $\Delta_{(v)}$ суммируются для половины ступеней. Полные углы закручивания определяются по той же формуле, что и для плоских ступеней:

$$\varphi_i = \frac{T_{in} \cdot L}{G \cdot I_k}.$$

Крутящий момент в i -й ступени (от нормативных нагрузок) вычисляется по формуле:

$$T_{iH} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^{i-1} P_{iH} + (i-1) \cdot W_H}{c} \right) + \frac{(P_{in} + W_H)}{2 \cdot c} \right] \cdot \frac{b}{2} - H_H \cdot h,$$

где H_H — значение суммарного распора от нормативных нагрузок.

Для определения декремента $H_H \cdot h$ необходимо рассчитать крутящие моменты (от

нормативных нагрузок) во всех ступенях марша, как и для плоских (неприазованных ступеней), по формуле:

$$T_{iH} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{i-1} P_{iH} + (i-1) \cdot W_H}{c} \right] + \frac{(P_{in} + W_H)}{2 \cdot c} \cdot \frac{b}{2}.$$

Декремент $H_n \cdot h$ равен среднему арифметическому значению крутящих моментов в ступенях: $H_n \cdot h = T_{ave n}$. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Перемещение отдельной ступени вычисляется по той же аналогии:

$$\Delta_{(v)} = h - h \cdot \cos \varphi_i + b \cdot \varphi_i.$$

Результаты расчетов перемещений приведены в табл. 6.

3. СП 20.13330.2016 [6, пп. 2а, 3, прим. 1 табл. Д.1] определяет максимально разрешенный прогиб равным:

$$f_u = \frac{2L}{120} = \frac{2 \cdot 100}{120} = 1,66 \text{ см.}$$

На основании консервативного суммирования компонентов деформации установлено, что суммарное перемещение конструкции, вызванное изгибом и кручением, определяемое по формуле $f_{max} + \delta_{(v)}$ и равно $0,032 + 0,114 = 0,146 \text{ см} < f_u = 1,66 \text{ см}$, где f_u — допустимый прогиб.

ТАБЛИЦА 5. Расчет усредненного момента кручения (от нормативных нагрузок)

Номер ступени (сверху вниз)	Крутящий момент	
	T_{in} , кН·м	T_{in} , кг·см
1	0,223	2274
2	0,669	6821
3	1,115	11 369
4	1,561	15 917
5	2,008	20 464
6	2,454	25 012
7	2,900	29 559
8	3,346	34 107
9	3,792	38 654
10	4,238	43 202
Усредненный крутящий момент $T_{ave n}$	2,231	22 738

Таким образом, представленный в настоящей статье расчет деформации ступеней из природного камня от изгиба с кручением соот-

ТАБЛИЦА 6. Расчет перемещений ступеней от кручения

Номер ступени (сверху вниз)	Крутящий момент T_{in} , кН·м	Крутящий момент T_{in} , кг·см	Вынос консоли L , см	Модуль сдвига G , кг·см ²	Момент инерции при кручении I_k , см ⁴	Полный угол закручивания φ_i , радиан	Перемещение ступени $\Delta_{(v)}$, см
6	0,223	2274	100	66 287	24 092,9	0,00014	0,0046
7	0,669	6821				0,00043	0,0137
8	1,115	11 369				0,00071	0,0228
9	1,561	15 917				0,00100	0,0319
10	2,008	20 464				0,00128	0,0410
Максимальное вертикальное перемещение ступеней $\delta_{(v)}$, см							0,114

ветствует требованиям действующих норм — жесткость конструкции обеспечена.

Заключение

Данной публикацией завершается цикл статей [1, 2], посвященных типологии каменных бескосоурных лестниц и аналитическим методам их расчета. При интерпретации результатов данных расчетов важно учитывать дополнительные запасы, являющиеся следствием ряда упомянутых ранее допущений [2].

В приводимом примере за счет перераспределения усилий как вверх, так и вниз марша, обусловленного припазовкой, значения максимальных крутящих моментов снижаются более чем в 2 раза по сравнению с плоскими ступенями без припазовки. Ранее нами упоминалось, что в практике обследований на реальных объектах встречается полное отсутствие контакта ступеней между собой [1]. Поэтому в практической работе использование расчетных схем, учитывающих положительный эффект от припазовки, допускается только при наличии достаточного объема обосновывающих материалов обследования.

Результаты сравнения геометрических характеристик сечения ступеней для расчета на кручение показали, что применение аналитических формул без учета паза дает более консервативные значения по сравнению с результатами машинных расчетов с учетом паза при помощи модуля «Консул» пакета SCAD Office. Для выполнения поверочных расчетов рекомендуется также проводить подобное сравнение и принимать во внимание наименьшее значение.

Список источников

1. Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц

в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2025. Т. 22, вып. 2. С. 509–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530.

2. Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 2 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями без припазовки) // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2025. Т. 22, вып. 3. С. 739–749. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-739-749

3. Приложение к приказу Минстроя РФ от 31.07.2017 №1056/пр. Сборник №4. Реставрация и воссоздание конструкций и декора из натурального камня. Приложение 3.

4. Лямин Н. Н. Естественные каменные строительные материалы. Вып. I. СПб.: Типография П. П. Сойкина, 1911. 74 с.

5. Субботин М. П. Строительное камневедение (технология естественных строительных камней). С приложением геологии строительного камня геолога Л. Е. Наливайко. Харьков — Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. 272 с.

6. СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия». М.: Стандартинформ, 2018.

7. Heyman J. The mechanics of masonry stairs // Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995. Pp. 259–265.

8. Little Ph., Hough M., Mullarkey E. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs // The Structural Engineer (IStructE). 2009. No. 87 (8). Pp. 26–33.

9. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Издательство стандартов, 1986.

Дата поступления: 09.12.2025

Решение о публикации: 11.02.2026

Контактная информация:

ВЕБЕР Михаил Давидович — ведущий инженер-конструктор;
mischaweber@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович — канд. техн. наук, декан факультета «Промышленное и гражданского строительства»; и. о. заведующего кафедрой «Строительные материалы и технологии», akuznetsov@pgups.ru

Reconstruction of cantilever stone staircases in the architecture of St. Petersburg. Part 3: how to calculate a straight flight staircase with plane treads

M. D. Veber¹, A. V. Kuznetsov²

¹ Inforsproekt LLC, 19 Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russia

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

For citation: *Veber M. D., Kuznetsov A. V. Reconstruction of cantilever stone staircases in the architecture of St. Petersburg. Part 3: how to calculate a straight flight staircase with plane treads // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 180–189. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-180-189. (In Russian)*

Abstract

Objective: to provide additional case studies of verification analysis for cantilever stone staircases in the context of structural surveys. **Materials and methods:** the case studies employ mathematical modelling techniques and draw on empirical data obtained from prior investigations. **Results:** the selected examples highlighted distinctive aspects of these structures. The analyses and interpretation of the findings have been carried out with consideration of their future implementation in practical projects. **Practical significance:** this paper aims to furnish practicing engineers with methodological guidance to support the conservation of historically valuable structures.

Keywords: stone structures, cantilever staircases, hanging stairs, inspection, reconstruction, restoration, verification calculations, calculation examples

References

1. Veber M.D., Kuznetsov A.V. K voprosu vosstanovleniya kamennykh beskosournykh lestnits v arkhitekture Sankt-Peterburga. Chast' 1 // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. SPb.: PGUPS, 2025. T. 22, vyp.2. S. 509–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530. (In Russian)

2. Veber M. D., Kuznetsov A. V. K voprosu vosstanovleniya kamennykh beskosournykh lestnits v arkhitekture Sankt-Peterburga. Chast' 2 (primer rascheta pryamogo marsha s ploskimi stupenyami bez

pripazovki) // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. SPb.: PGUPS, 2025. T. 22, vyp. 3. S. 739–749. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-739-749. (In Russian)

3. Prilozhenie k prikazu Ministroya RF ot 31.07.2017 No.1056/pr. Sbornik No. 4. Restavratsiya i vossozdanie konstruksij i dekora iz estestvennogo kamnya. Prilozhenie 3. (In Russian)

4. Lyamin N. N. Estestvennye kamennye stroitel'nye materialy. Vyp. I. SPb.: Tipografiya P. P. Sojkina, 1911. 74 s. (In Russian)

5. Subbotin M.P. Stroitel'noe kamnevedenie (tehnologiya estestvennykh stroitel'nykh kamnej). S prilozheniem geologii stroitel'nogo kamnya geologa L. E. Nalivajko. Khar'kov — Kiev: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo Ukrainy, 1935. 272 s. (In Russian)

6. SP 20.13330.2016 “SNiP 2.01.07-85* Nagruzki i vozdejstviya”. M.: Standartinform, 2018. (In Russian)

7. Heyman J. The mechanics of masonry stairs // Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995. Pp. 259–265.

8. Little Ph., Hough M., Mullarkey E. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs // The Structural Engineer (IStructE). 2009. No. 87 (8). Pp. 26–33.

9. GOST 21153.8-88. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri ob'emnom szhatii. M.: Izdatel'stvo standartov, 1986. (In Russian)

Received: 09.12.2025

Accepted: 11.02.2026

Author's information:

Mikhail D. VEBER — Senior structural engineer;
SPIN: 5863-2454, AuthorID: 1301574;
mischaweber@mail.ru;

Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering,
Acting Dean of the Faculty of “Industrial and Civil
Engineering”, Head of the Department of “Building
Materials and Technologies”; Scopus 57205441909,
WoS ResearcherID: HPH-1274-2023, ORCID:
0000-0002-3809-399X, SPIN: 8756-5314, AuthorID:
659654; akuznetsov@pgups.ru

УДК 691.16

Разработка способа изготовления модифицированного битумно-полимерного вяжущего

Е. В. Мурузина¹, Ф. М. Ахметов¹, Л. Ф. Казанская²

¹Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета (КФУ), Россия, 423800, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 13

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

Для цитирования: 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

Аннотация

Цель: разработка технологической схемы изготовления битум-полимерной композиции на эффективном модификаторе, так как существующий в России дефицит нефтяного битума, его недостаточная стойкость к климатическим условиям страны, а также отсутствие поставок зарубежного производственного оборудования подталкивают к поиску новых технологий производства битумных вяжущих. Традиционное окисление нефти не всегда позволяет получить битум с необходимым набором свойств. Одним из наиболее перспективных решений является модификация битума полимерами. **Методы:** использованы методы оптической микроскопии и ядерного магнитного резонанса при исследовании структуры и свойств вяжущего, а также реологический, термомеханический методы и стандартные методы испытаний битумов. **Результаты:** в качестве модификатора битума при проведении исследований рассматривается смесевой эластомерный термоэластопласт. Исследовано влияние на время растворения полимера таких факторов, как дисперсность, температура и концентрация предварительно растворенного полимера в пластификаторе (мазуте). В зависимости от этих факторов формируется технологическая схема с привязкой соответствующего оборудования. **Практическая значимость:** на лабораторной установке продемонстрирована эффективность применения битумного модификатора в соответствии с предложенной технологической схемой. Промышленное изготовление битумно-полимерных материалов должно включать в свой состав, кроме модифицированного вяжущего, и минеральный наполнитель в виде каолина, доломитовой муки или талька в качестве добавки. Данный прием позволяет повысить эксплуатационную стабильность и удешевить композицию.

Ключевые слова: битумно-полимерное вяжущее, модификация, технологическая схема, изготовление, модифицирующая добавка, диспергирование

Введение

Битум — органическое вяжущее в строительном материаловедении, отличающееся повышенными гидроизоляционными и адгезионными свойствами с хорошими экономическими показателями. Данный факт обуслав-

ливает эффективное применение битума для водонепроницаемых кровельных покрытий и получения асфальтобетонных смесей.

Битум, как правило, получают в результате окисления продуктов прямой и остатков атмосферно-вакуумной перегонки нефти

согласно ГОСТ 9548-2023 «Битумы нефтяные кровельные. Технические условия». Изготовленные таким образом битумы не удовлетворяют требованиям стойкости к внешним условиям и работы в разных климатических регионах нашей страны [1].

В работе [2] представлен модификатор, влияющий на скорость окисления нефти, который улучшает свойства битумных материалов на стадии получения битума. В работе [3] авторы приводят исследования по получению и условию синтеза битума марки БНД 60/90 с использованием модификатора на основе *p*-фенилендиамина, формалина и глицина.

Применение полимеров для модификации битумов подтверждено рядом исследований [4–7], включая модификации дорожных битумов наноразмерными частицами — углеродными нанотрубками [8]. В настоящее время изучаются не только процессы совмещения полимера в битуме [1, 9], но и получаемые в комплексе свойства [10–11], включая долговечность [4] получаемого модифицированного вяжущего.

Для изготовления в заводских условиях битумно-полимерного вяжущего и материалов на его основе необходимо предоставлять технологию изготовления: последовательность операций, режим приготовления, а также необходимое оборудование с установками. Существуют работы, посвященные этой тематике, в том числе патент на технологическую схему битумно-полимерных композиций [12], технология производства модифицированного битумного вяжущего непрерывным способом по поточной схеме производства и автоматизации [13] и др.

Предложенные технологические цепочки целесообразны для определенного вида как полимерного модификатора, так и битума.

Целью данной работы является разработка технологической схемы изготовления битумно-полимерной композиции (БПК) на эффективном модификаторе с использованием предлагаемой установки.

Методы и материалы исследований

Использованы методы оптической микроскопии и ядерного магнитного резонанса при исследовании структуры и свойств БПК, а также реологический, термомеханический и стандартные методы испытаний битумов.

Материалом в работе является нефтяной битум БНК-40/180 (ПАО «АНК «Башнефть», Республика Башкортостан, Россия). В качестве модифицирующей добавки использовался смесевой термоэластопласт (ТЭП) в виде гранул размером около 3–4 мм белого цвета. Это готовый продукт из этиленпропиленового каучука СКЭПТ-40 и изопренового каучука СКИ, а также полиэтилена высокого давления ПЭВД в соотношении 1:1:2. В [2] было обосновано применение подобного полимера как эффективного варианта модификации кровельного битума для II климатического пояса (Поволжье).

Результаты

В производственных условиях важно, чтобы полимерная часть как можно качественнее и быстрее растворялась в объеме битума, что возможно в первую очередь при увеличении дисперсности модификатора за счет уменьшения размера зерен.

На рис. 1 показана зависимость времени растворения полимера при температуре 180 °С от размера частиц модификатора.

Видно, что кривая носит практически линейный характер: уменьшение размеров частиц модификатора приводит к увеличению скорости их растворения в битуме.

График показывает, что при самой наименьшей дисперсности частиц (до 1 мм) время растворения составит около 4 часов, при размере частиц около 4 мм — до 8 часов. Таким образом, процесс растворения полимера в битуме осуществляется качественнее и быстрее при увеличении степени измельчения полимера.

Зависимость времени растворения полимера в битуме от температуры приведена на рис. 2. Характер графика аналогичен кривой скорости растворения термоэластопласта в толуоле [4]. Это позволяет говорить об идентичном характере растворения представленного модификатора в органических моделях.

С увеличением температуры раствора со 120 до 150 °С скорость растворения полимера снижается более чем в 1,8 раза. Поэтому при заводском изготовлении расплава важно не отклоняться от температурного регламента.

Влияние дисперсности полимера и температуры раствора является важным фактором при изготовлении модифицированных композиций. Однако при промышленном изготовлении БПК существуют свои особенности. Стоит рассмотреть возможность внедрения такой типичной заводской операции, как промежуточное растворение полимера в пластификаторе (гудрон, мазут, техническое масло) [1].

На рис. 3 представлена зависимость времени растворения полимера в битуме от содержания его в пластификаторе. Содержание мазута в растворе составило 10%.

Из представленного графика видно, что по мере увеличения количества модификатора в вяжущем время его растворения в битуме (при одной и той же температуре раствора) значительно увеличивается, несмотря на содержание в композиции пластификатора. Это особенно нецелесообразно в заводских условиях. Высокая концентрация полимера (более 15%) в композиции и наличие даже 10% мазута ста-

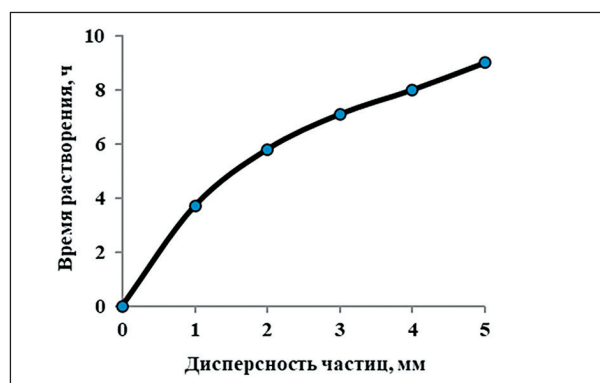


Рис. 1. Зависимость времени растворения полимера в битуме при $t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ от дисперсности частиц (содержание полимера — 15%)

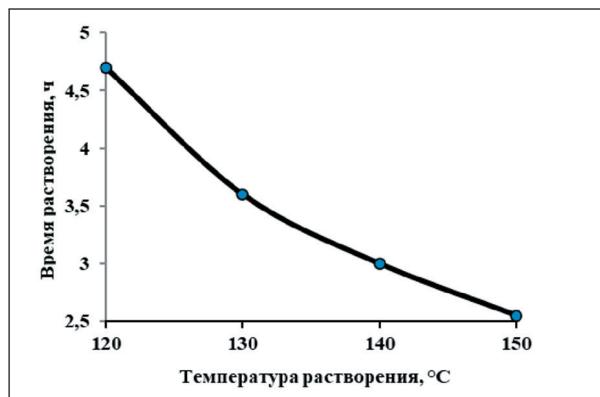


Рис. 2. Зависимость времени растворения от температуры полимера в битуме (содержание полимера — 10%, дисперсность — 2,5 мм)

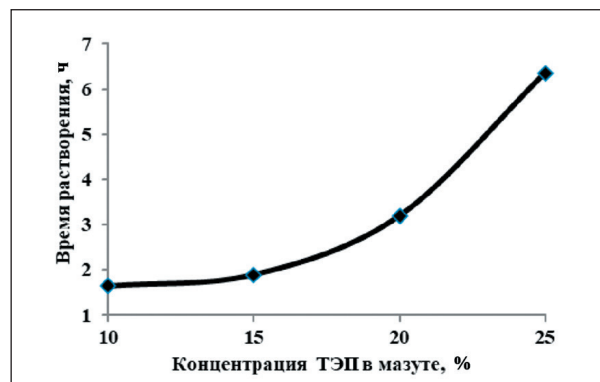


Рис. 3. Зависимость времени растворения полимера в битуме при дисперсности 2,5 мм от содержания полимера в пластификаторе

новятся препятствием для полного совмещения модификатора с битумом. Таким образом, при введении любых концентраций модифицирующей добавки желателен предварительный растворять полимер в пластификаторе, а также не увеличивать содержание модификатора в растворе битума более 10–15%.

При получении модифицированного раствора изготовитель должен стремиться к равномерному распределению высокомолекулярной добавки по всему объему битума. Оптимального результата растворения в условиях производства можно добиться, если перевести полимер в более или менее вязкое подвижное состояние.

Авторы считают, что наилучшим вариантом решения данной задачи является использование для активного смешения модификатора с битумом роторно-пульсационного аппарата (РПА).

Нами на лабораторной установке были опробованы разные комбинации растворения модификатора в битуме: подбирались температура, время, концентрация модификатора, а также рассматривалась возможность введения через раствор пластификатора (наиболее оптимальным представился гудрон).

Наиболее приемлемый способ получения БПК представлен на рис. 4. Начальный битум перемещается из резервуара (1) в накопитель (2) с помощью шестеренчатого насоса Н1, где соблюдается температурный режим 190–210 °С. Изготовление модифицированного вяжущего осуществляется по циклической схеме благодаря насосам и прогреваемым трубопроводам.

Перед запуском РПА1 битум или пластификатор (гудрон, мазут) в количестве около 0,2 м³ самотеком подается в смесительный бак (3) из накопительного бака (2).

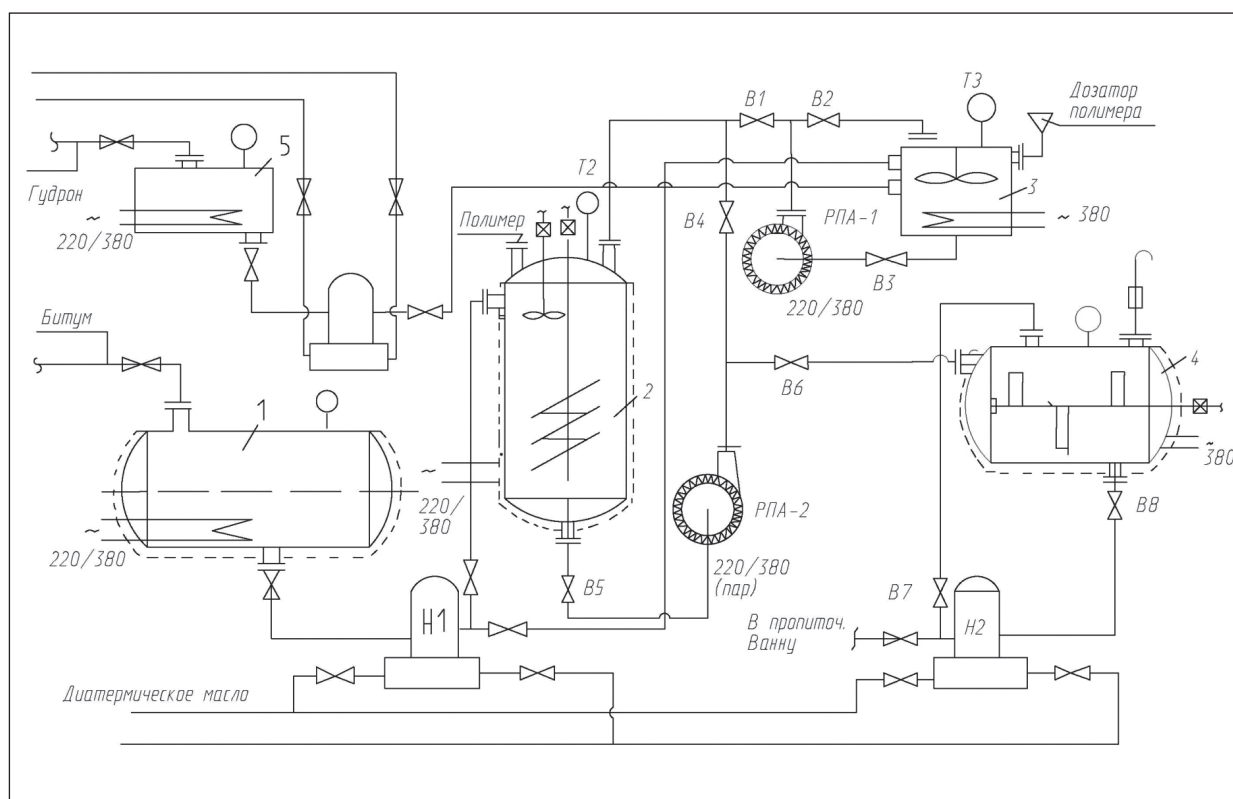


Рис. 4. Предложенная схема изготовления битумно-полимерной композиции

Скорость подачи регулируется клапаном В1, объем залитого битума или пластификатора фиксируется датчиками в баке (3).

При заполнении расчетного объема в смесительном баке задвижка В1 перекрывается, В2 и В3 открываются, и запускается двигатель РПА, при этом начинается циркуляция битума по контуру «РПА1 — трубопроводы — смесительный бак (3)». Движение растворителя без подачи в него полимера осуществляется в течение 15–20 минут. Влияние переходных процессов (выпуск воздуха из циркуляционного контура, стабилизация гидро- и термодинамических режимов) корректируется благодаря регулировке температуры битума с пластификатором в смесительном баке (3) посредством температурного датчика Т3.

По истечении настройки в системе рассчитанное количество полимера подается в смесительный бак (3) для получения концентрата (раствор 20–30%).

Последующая работа РПА1 увеличивает все большее диспергирование полимера с интенсивным смешением битума и пластификатора. Время приготовления смеси по представленному контуру и температурные режимы подстраиваются в зависимости от получения однородной массы.

По окончании предполагаемого времени изготовление полимерного концентрата считается завершенным. Мотор РПА1 выключается, клапаны В1 и В4 открываются, а В2 и В3 перекрываются, запускается РПА1, и плановое количество концентрата поступает в бак (2), оснащенный шиновой и лопастной мешалками. Перед запуском РПА2 отключается РПА1, задвижки В1 и В6 закрываются, В5 открывается. Добавочная порция битума перемещается с помощью насоса Н1 из накопительного бака (1) в резервуар (2).

Объемы концентрата и подаваемого битума регистрируются датчиками в емкости

или метками. В завершение предварительной работы включается двигатель РПА2, и концентрированный полимерный модификатор диспергируется в битуме. Температура в емкости контролируется датчиком температуры Т2. Длительность производственного цикла в РПА1 меняется по мере формирования однородной консистенции.

По мере изготовления модифицированной композиции мотор РПА2 выключается, клапаны В5 и В6 открываются. В емкость добавляется наполнитель, в процесс включается шестеренчатый насос Н2, и готовое вяжущее подается из смесителя (2) в емкость готового продукта (4). Изготовление следующей партии БПК будет проводиться по вышеприведенному режиму до того момента, когда концентрат модификатора в смесительном баке (3) подойдет к концу. Приобретение следующей порции концентрата может идти одновременно с изготовлением модифицированного вяжущего.

Предусматривается рециркуляция готовой композиции в емкости (4) путем перекачивания нагнетателем Н2. Это позволяет улучшить гидродинамическую атмосферу диффузионных процессов растворения и распределение полимера по всему объему продукта.

Дискуссия

Следует отметить, что при изготовлении модифицированного вяжущего поддерживается стабильный температурный режим всей технологической линии: оборудование должно быть оснащено электронагревателями, а трубопроводы теплоизолированы.

Емкость для приготовления модифицированного концентрата имеет теплоизоляционную оболочку (объемом более 0,33 м³) с электрическим подогревом, в которую будет подаваться расплавленный битум или пластификатор. Эта емкость должна быть оснащена

скоростной мешалкой (со скоростью вращения ≥ 700 об./мин.).

Для повышения эффективности смешения данная технологическая схема предусматривает в своем составе наличие малого РПА, работающего в рециркуляционном режиме растворения полимера в битуме или сначала в пластификаторе. В накопительный бак (2) объемом около 2 м³ направляется порция готового полимерного концентрата и перемешивается с битумом.

Промышленное изготовление битумно-полимерных материалов должно включать в их состав, кроме модифицированного вяжущего, и минеральный наполнитель в виде каолина, доломитовой муки или талька в качестве добавки. Данный прием позволяет повысить эксплуатационную стабильность и удешевить композицию.

Заключение

Таким образом, в ходе проведения исследований:

1. Выявлены факторы изготовления битумно-полимерного вяжущего (температура, дисперсность, количество полимера и содержание пластификатора).

2. Разработана лабораторная установка с применением роторно-пульсационного типа (РПА) и технологическая схема изготовления модифицированного битумно-полимерного вяжущего, которое рекомендовано изготавливать в два цикла:

а) изготовление концентрированного раствора модификатора в пластификаторе (возможно до 30%-го раствора) или в битуме при температуре 150–160 °С в реакторе с мешалкой и РПА;

б) после получения концентрата необходимо направить его в смеситель с битумом, где будет использоваться РПА в режиме рециркуляции.

3. Наиболее подходящим для модификации маловязкого битума БНК-40/180 является предложенный смесевой термоэластопласт.

Список источников

1. Разработка составов полимербитумного вяжущего для приготовления асфальтополимербетона / Г.В. Васильевская [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2023. № 3 (99). С. 399–408.

2. Кемалов Р. А., Кемалов А. Ф. Технология комплексной модификации битумных изоляционных материалов // Экспозиция. Нефть. Газ. 2013. № 5 (30). С. 21–26.

3. Росилов М. С., Бекназаров Х. С., Чулиев Ж. Р. Изучение производства битума марки ПФГ-РМ путем модификации битума марки БНД 60/90 // Universum: технические науки. 2025. № 2 (131). С. 29–37.

4. Мурузина Е. В. Битум-полимерные композиции кровельного назначения: дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2000. 189 с.

5. Битум-полимерное вяжущее: пат. 2184751 С2 Рос. Федерация. № 2000109181/04 / Шутилин Ю. Ф., Смирных А. А.; заявл. 12.04.2000, опубл. 10.07.2002. Воронежская государственная технологическая академия. 6 с.

6. Битумно-полимерные вяжущие строительного назначения / Д. А. Аюпов [и др.] // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2014. № 2 (2). С. 27–35.

7. Модификация битумов как способ повышения их эксплуатационных свойств / С. И. Вольфсон [и др.] // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 17. С. 29–33.

8. Прибылов В. С., Пичугин А. П. Эффективность модификации битума нанодобавками в асфальтобетоне на сталеплавильных шлаках // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 95–100.

9. Regulation of the Rheological of Polymer-Bitumen Binders by Ultrasonic Intensification of Mixing Process / R. Avdeychev [at al.] // International

Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 2, no. 22. Pp. 11926–11932.

10. Блок-сополимерная композиция и способ ее получения: пат. 2767539 С1 Рос. Федерация. № 2020134924 / Аветисова Н.В., Аксенов К.В., Сетракова А.Э.; заявл. 25.10.2020; опубл. 17.03.2022. Публичное акционерное общество «СИБУР Холдинг». 23 с.

11. Becker Y., Mendez M. P., Rodriguez Y. Polymer modified asphalt // Vision tecnologica. 2001. Vol. 9, no. 1. Pp. 39–50.

12. Способ получения битум-полимерной композиции со сниженным выбросом H₂S: пат. 2616043 С2 Рос. Федерация. № 2014124838 / Шредер Зенке (DE); заявл. 17.12.2012; опубл. 12.04.2017. Тоталь Маркетинг Сервис. 21 с.

13. Технология производства нефтяных дорожных битумов, модифицированных нефтешламом и СБС-полимером / Р. Н. Ахметзанова [и др.] // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22. № 12. С. 88–92.

Дата поступления: 17.01.2026

Решение о публикации: 06.02.2026

Контактная информация:

МУРУЗИНА Елена Васильевна — канд. техн. наук, доцент; sds-m7lab@mail.ru

АХМЕТОВ Фриль Мирзанурович — канд. техн. наук, доцент; akhmetov_fril@mail.ru

КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — д-р техн. наук, профессор; yalifa@inbox.ru

Development of a method for producing a modified bitumen-polymer binder

E.V. Muruzina¹, F.M. Akhmetov¹, L.F. Kazanskaya²

¹ Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University, 13 pr. Mira, Naberezhnye Chelny, 423800, Russia

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

For citation: *Muruzina E.V., Akhmetov F.M., Kazanskaya L. F.* Development of a Method for Manufacturing a Modified Bitumen-Polymer Binder // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 190–197. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-190-197. (In Russian)

Abstract

Objective: to develop a technological scheme that uses an efficient modifier to produce a bitumen-polymer mixture. This research is motivated by the lack of petroleum bitumen available domestically, poor resilience of available bitumen to Russia's climate, and limited access to foreign production equipment, all of which necessitate new technologies for the production of bituminous binders. Polymer modification is regarded as one of the most promising alternatives to traditional oil oxidation techniques that do not consistently produce bitumen with the necessary property set. **Methods:** optical microscopy and nuclear magnetic resonance spectroscopy were used to study the structure and properties of the binder. In addition to standard bitumen testing protocols, rheological and thermal mechanical analyses were employed to assess the binder's performance. **Results:** the research employed a mixed elastomeric thermoplastic as a bitumen modifier. It has been investigated how polymer-dissolving time affects variables including dispersion, temperature, and pre-dissolved polymer concentration in the plasticizer (fuel oil). Based on these parameters, a process flow diagram specifying the required equipment has been developed. **Practical significance:** a laboratory setup validates the effectiveness of the bitumen modifier when implemented in

accordance with the proposed process diagram. For industrial production of bitumen-polymer, the modified binder should be complemented with a mineral filler as an additive, such as kaolin, dolomite flour, or talc. This technique allows for increased operational stability and reduced costs.

Keywords: bitumen-polymer binder, modification, technological scheme, production, modifying additive, dispersion

References

1. Razrabotka sostavov polimerbitumnogo vyzhushchego dlya prigotovleniya asfal'topolimerbetona / G. V. Vasilovskaya [i dr.] // Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. No. 3 (99). S. 399–408. (In Russian)
2. Kemalov R.A., Kemalov A.F. Tekhnologiya kompleksnoj modifikatsii bitumnykh izolyatsionnykh materialov // Ekspozitsiya. Neft'. Gaz. 2013. No. 5 (30). S. 21–26. (In Russian)
3. Rosilov M. S., Beknazarov Kh. S., Chýliev Zh. R. Izuchenie proizvodstva bituma marki PFG-RM putem modifikatsii bituma marki BND 60/90 // Universum: tekhnicheskie nauki. 2025. No. 2 (131). S. 29–37. (In Russian)
4. Muruzina E. V. Bitum-polimernye kompozitsii krovel'nogo naznacheniya: diss. ... kand. tekhn. nauk. Kazan', 2000. 189 s. (In Russian)
5. Bitum-polimernoe vyzhushchee: pat. 2184751 C2 Ros. Federatsiya. No. 2000109181/04 / Shutilin Yu. F., Smirnykh A.A.; zayavl. 12.04.2000, opubl. 10.07.2002. Voronezhskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiya. 6 s. (In Russian)
6. Bitum-polimernye vyzhushchie stroitel'nogo naznacheniya / D.A. Ayupov [i dr.] // Polimery v stroitel'stve: Nauchnyj internet-zhurnal. 2014. No. 2 (2). S. 27–35. (In Russian)
7. Modifikatsiya bitumov, kak sposob povysheniya ikh ekspluatatsionnykh svoystv / S. I. Vol'fson [i dr.] // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2016. T. 19, no. 17. S. 29–33. (In Russian)
8. Pribylov V.S., Pichugin A.P. Effektivnost' modifikatsii bituma nanodobavkami v asfal'tobetone na staleplavil'nykh shlakakh // Ekspert: teoriya i praktika. 2023. No. 4 (23). S. 95–100. (In Russian)
9. Regulation of the Rheological of Polymer-Bitumen Binders by Ultrasonic Intensification of Mixing Process / R. Avdeychev [at al.] // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, no. 22. Pp. 11926–11932.
10. Blok-sopolimernaya kompozitsiya i sposob ee polucheniya: pat. 2767539 C1 Ros. Federatsiya. No. 2020134924 / Avetisova N.V., Aksenov K.V., Setrakova A.E.; zayavl. 25.10.2020; opubl. 17.03.2022. Publichnoe aktsionerное obshchestvo "SIBUR Kholding". 23 s. (In Russian)
11. Becker Y., Mendez M. P., Rodriguez Y. Polimer modified asphalt // Vision tecnologica. 2001. Vol. 9, no. 1. Pp. 39–50.
12. Sposob polucheniya bitum-polimernoj kompozitsii so snizhennym vybrosom H₂S: pat. 2616043 S2 Ros. Federatsiya. No. 2014124838 / Shreder Zenke (DE); zayavl. 17.12.2012; opubl. 12.04.2017. Total' Marketin Servis. 21 s. (In Russian)
13. Tekhnologiya proizvodstva neftyanykh dorozhnykh bitumov, modifitsirovannykh nefteshlamom i SBS-polimerom / R. N. Akhmetzanova [i dr.] // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2019. T. 22. No. 12. S. 88–92. (In Russian)

Received: 17.01.2026

Accepted: 06.02.2026

Author,s information:

Elena V. MURUZINA — PhD in Engineering, Associate Professor; sds-m7lab@mail.ru

Fril M. AKHMETOV — PhD in Engineering, Associate Professor; akhmetov_fril@mail.ru

Liliya F. KAZANSKAYA — D. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru

УДК 69.04

Определение максимальных (опорных) моментов и их зависимости в статически неопределимых стержнях при отнулевом цикле изменения температуры

П. А. Пегин, А. А. Шульгин, А. В. Павловец

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

Для цитирования: Пегин П. А., Шульгин А. А., Павловец А. В. Определение максимальных (опорных) моментов и их зависимости в статически неопределимых стержнях при отнулевом цикле изменения температуры // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 198–208. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-198-208

Аннотация

Цель: провести расчеты и анализ напряжений и усилий в сечениях простейших статически неопределимых стержней при циклическом изменении температуры. **Методы:** рассмотрено два типа стержней, образующих основную систему, принятую в методе перемещений. Стержень первого типа имеет жесткую заделку на одном из концов и шарнирно-подвижную опору на другом. Полным аналогом такого элемента является стержень с продольно-скользящей заделкой и неподвижным шарниром на концах. Стержень второго типа имеет на концах жесткую заделку и продольно-скользящую заделку. Названные типы стержней исследовались при отнулевом цикле изменения температуры. При этом, помимо напряжений, определялись также максимальные усилия — изгибающие моменты, чего не было в статически определимом стержне. **Результаты:** было установлено, что значения максимальных напряжений и максимальных моментов стремятся к стационарным значениям при увеличении времени цикла и уменьшении высоты сечения стержня. Максимальные сжимающие напряжения при циклических тепловых воздействиях заметно превышают их величины при установившейся температуре и достигают 35 %. **Практическая значимость:** полученные аппроксимирующие функции $k_{\sigma}(t_c, h)$, $k_M(t_c, h)$ для напряжений, моментов могут применяться для дальнейшего использования при расчете стержневых систем. Для большей точности можно воспользоваться полученными табличными значениями функции, k_M и линейной интерполяцией между этими значениями.

Ключевые слова: стержень, усилия, напряжения, температура, цикл, статика, эксперимент

Для простейших статически неопределимых стержней исследование напряжений и усилий в сечениях при циклическом изменении температуры производилось при тех же исходных данных, что и для статически определимого стержня. Были приняты те же характеристики температурных режимов и физико-механические свойства материала, рассматривались такие же виды и диапазоны изменения влияющих факторов [1, 2].

Разница заключалась в граничных условиях на концах стержней. Рассмотрено два типа стержней, которые образуют основную систему, принятую в методе перемещений. Стержень первого типа имеет жесткую заделку на одном из концов и шарнирно-подвижную опору на другом. Полным аналогом такого элемента является стержень с продольно-скользящей заделкой и неподвижным шарниром на концах. Стержень второго типа имеет на концах

жесткую заделку и продольно-скользящую заделку [3].

Названные типы стержней исследовались при отнулевом цикле изменения температуры. Помимо напряжений, определялись также максимальные усилия — изгибающие моменты, чего не было в статически определимом стержне.

Были проведены следующие исследования:

1. Получение значений максимальных (опорных) моментов M при циклическом воздействии и их сравнение с аналогичными известными моментами M_c при установившейся температуре.

2. Получение зависимостей, связывающих максимальные напряжения (моменты) при ци-

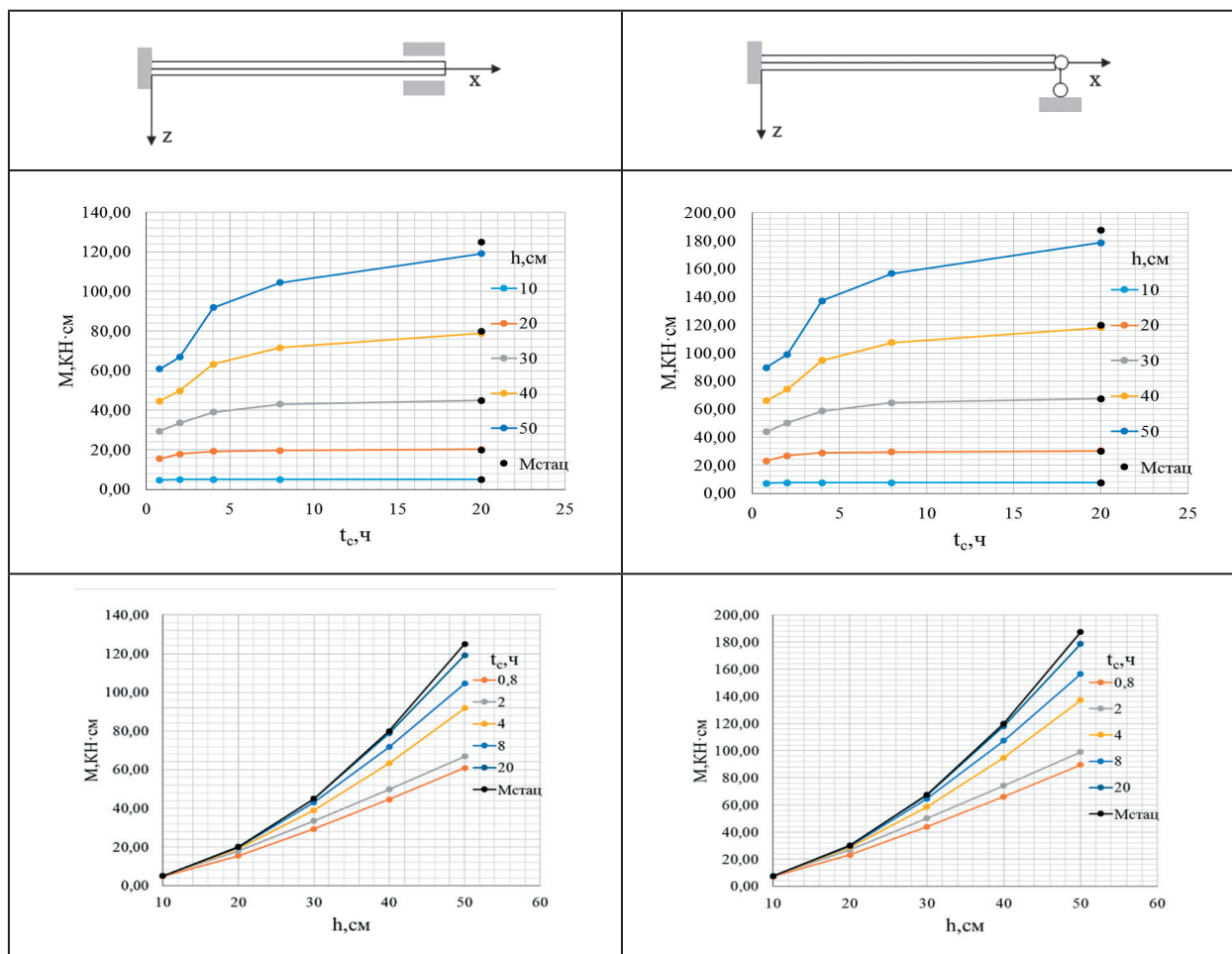
клическом воздействии с их величинами при установившейся температуре посредством числовых коэффициентов: $\sigma(t_c, h, \sigma_c) = k_\sigma \sigma_c$ и $M(t_c, h, M_c) = k_M M_c$.

Исследование зависимости опорных моментов от высоты сечения стержня h и периода цикла t_c

Изучение зависимости опорных моментов от периода цикла и высоты сечения проводилось в том же порядке, что и исследование напряжений.

Для стержней первого и второго типов графики этих зависимостей показаны в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Графики максимальных моментов M (кН · см) при различных высотах сечения h и периоде цикла t_c



Как можно заметить, характер изменения моментов в обоих условиях закрепления стержня схож, значения моментов M отличаются в 1,5 раза, как и при стационарном режиме.

Максимальные опорные моменты M возрастают при увеличении высоты сечения и времени цикла.

Максимальные моменты M сравнивались с моментами при стационарном тепловом воздействии M_c , возникающими в опорах (табл. 1).

Опорный момент M_c при стационарном режиме для стержня второго типа вычислялся по известной формуле:

$$M_c = \alpha_t EI \frac{T}{h}. \quad (1)$$

Для стержня первого типа опорный момент вычислялся по формуле:

$$M_c = 1,5\alpha_t EI \frac{T}{h}. \quad (2)$$

Значения моментов при стационарном тепловом воздействии обозначены черными точками на графиках.

Сравнивая значения M и M_c , можно заметить, что максимальные моменты при нестационарном тепловом воздействии меньше, чем при установившемся тепловом воздействии. Значения M максимально приближаются к значениям M_c при $t_c = 20$ ч.

Получение зависимостей напряжений и опорных моментов от влияющих факторов

Представляет интерес получить зависимости, выражающие максимальные напряжения и максимальные опорные моменты при циклическом изменении температуры через соответствующие известные значения при установившейся температуре [1–3].

Для этого представим искомые функции в виде зависимостей:

- для напряжений:

$$\sigma(t_c, h, \sigma_c) = k_\sigma \sigma_c; \quad (3)$$

- для моментов:

$$M(t_c, h, \sigma_c) = k_M M_c, \quad (4)$$

где числовые коэффициенты, зависящие от двух переменных (времени цикла t_c и высоты сечения h):

$$k_\sigma = k_\sigma(t_c, h); \quad (5)$$

$$k_M = k_M(t_c, h). \quad (6)$$

Значения коэффициентов k_σ и k_M , полученные из численного анализа напряжений и моментов, вычисляются для заданных точек [4–7].

Например, полученные максимальные сжимающие напряжения при $t_c = 20$ ч и $h = 50$ см составляют 4,39 МПа, при стационарном режиме напряжения — 3,00 МПа. То есть в данном случае:

$$\frac{-\sigma}{\sigma_c} = \frac{4,39}{3,00} \Rightarrow -\sigma = 1,46\sigma_c, \quad (7)$$

или $k_{-\sigma} = 1,46$. На основе подобных вычислений составлена таблица значений коэффициентов для напряжений (табл. 2).

По табличным значениям были построены графики $k_{-\sigma}$ для максимальных сжимающих напряжений (табл. 3).

Значения коэффициентов k_M для максимальных моментов получаются аналогично: путем деления значений M на значение M_c . На этой основе формируется таблица коэффициентов k_M (табл. 4).

По табличным значениям были построены графики значений k_M для максимальных моментов (табл. 5).

Аппроксимация функций $k_\sigma(t_c, h)$ и $k_M(t_c, h)$

Аппроксимация зависимостей k_σ и k_M была проведена методом наименьших квадратов как функций двух переменных t_c и h по варианту, предложенному С. С. Лавровым [11].

ТАБЛИЦА 2. Значения коэффициентов $k_{-\sigma}$ для максимальных сжимающих напряжений $-\sigma = k_{-\sigma} \cdot -\sigma_c$

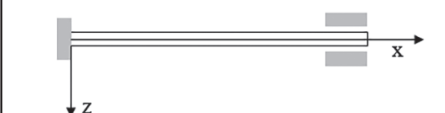

$h, \text{ см}$	$t_c, \text{ ч}$										
		0,8	2,0	4,0	8,0	20,0	0,8	2,0	4,0	8,0	20,0
10		1,46	1,24	1,12	1,03	1,00	1,26	1,14	1,07	1,02	1,00
20		1,70	1,56	1,47	1,24	1,07	1,33	1,32	1,27	1,14	1,04
30		1,78	1,70	1,63	1,44	1,21	1,33	1,36	1,33	1,25	1,12
40		1,82	1,78	1,71	1,56	1,35	1,34	1,37	1,34	1,30	1,20
50		1,84	1,82	1,76	1,64	1,46	1,35	1,37	1,34	1,32	1,27

ТАБЛИЦА 3. Графики функций $k_{-\sigma}$ для максимальных сжимающих напряжений $-\sigma$ при различных высотах сечения h и периоде цикла t_c

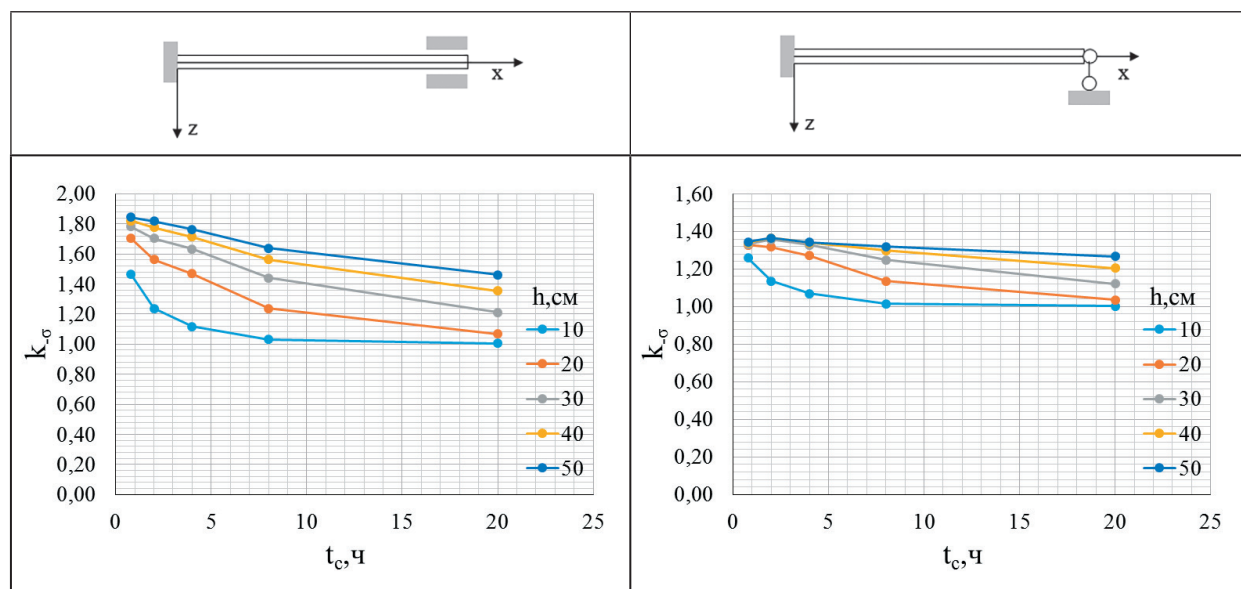


ТАБЛИЦА 4. Значения коэффициентов k_M для максимальных моментов $M = k_M \cdot M_c$



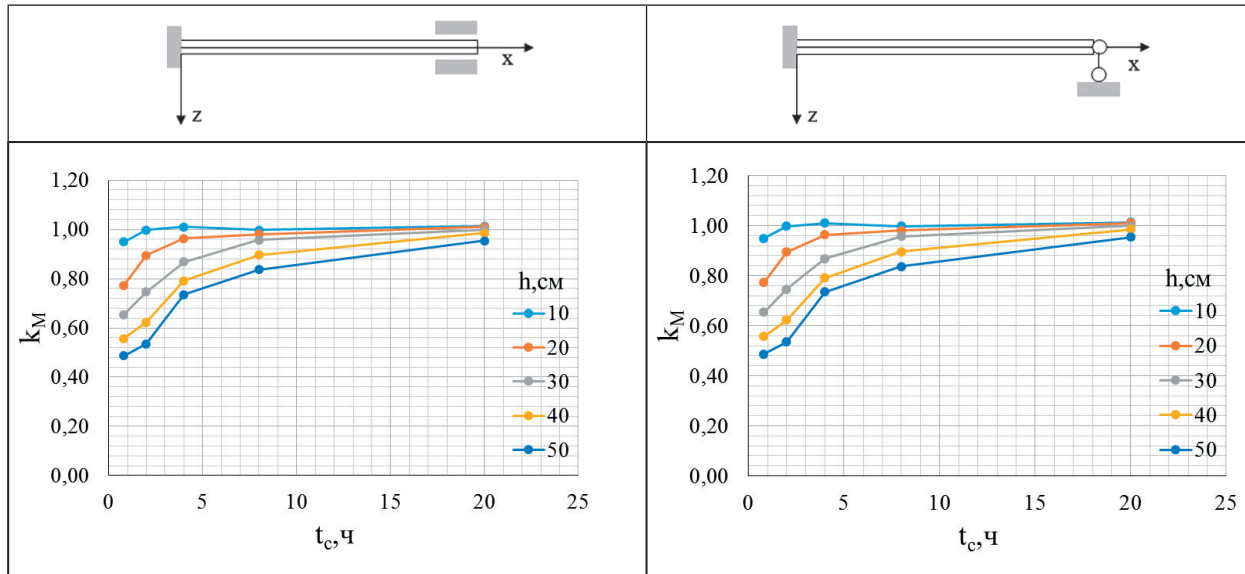
$h, \text{ см}$	$t_c, \text{ ч}$										
		0,8	2,0	4,0	8,0	20,0	0,8	2,0	4,0	8,0	20,0
10		0,95	1,00	1,01	1,00	1,01	0,95	1,00	1,01	1,00	1,01
20		0,77	0,89	0,96	0,98	1,01	0,77	0,89	0,96	0,98	1,01
30		0,65	0,74	0,87	0,96	1,00	0,65	0,74	0,87	0,96	1,00
40		0,55	0,62	0,79	0,90	0,98	0,55	0,62	0,79	0,90	0,98
50		0,48	0,53	0,73	0,84	0,95	0,48	0,53	0,73	0,84	0,95

ТАБЛИЦА 5. Графики функций k_M для максимальных моментов M при различных высотах сечения h и периоде цикла t_c



Приближенное значение для функции F будем искать в виде полинома второй степени. Для функции двух переменных он имеет вид:

$$F(x_{10} + \xi_1, x_{20} + \xi_2) = a_0 + a_1\xi_1 + a_2\xi_2 + \frac{1}{2}(a_{11}\xi_1^2 + 2a_{12}\xi_1\xi_2 + a_{22}\xi_2^2). \quad (8)$$

Здесь: F — приближаемая функция k_c или k_M ;

x_{10} и x_{20} — значения переменных параметров t_c и h в середине интервала аппроксимации:

$$x_{10} + \xi_1 = t_c \quad (9)$$

и

$$x_{20} + \xi_2 = h \quad (10) \text{ — текущие значения этих параметров;}$$

ξ_1 и ξ_2 — отклонения текущих значений от значений в середине интервала аппроксимации;

константы a_0, a_i, a_{ij} — коэффициенты аппроксимации, которые предстоит выбрать из условия наилучшего приближения функции в заданных точках.

Получены следующие аппроксимирующие функции для максимальных сжимающих напряжений (табл. 6).

Также получены аппроксимирующие функции для максимальных моментов (табл. 7).

Сравнение графиков функций $k_c(t_c, h)$ до аппроксимации и после применения аппроксимированных функций приведено в табл. 8.

Погрешность аппроксимации для сжимающих напряжений допустимо мала и достигает 9,77 % и 6,24 % соответственно.

Сравнение графиков функций $k_M(t_c, h)$ до аппроксимации и после применения аппроксимированных функций демонстрируется в табл. 9.

Погрешность аппроксимации для сжимающих напряжений допустимо мала и достигает 6,84 % и 7,17 % соответственно.

Полученные поправочные коэффициенты в табличной форме или в форме полученной функциональной зависимости позволяют свести задачу об усилиях и напряжениях в стержнях, например, основной системе метода перемещений при циклических температурных воздействиях, к известной задаче о воздействии установившегося изменения температуры [12–15]. Коэффициенты могут

ТАБЛИЦА 6. Аппроксимирующие функции $k_{-\sigma}$ для максимальных сжимающих напряжений $-\sigma$



	
<p>Для интервала $t_{c1} = 0,8$ до $10,4$ ч.</p> $k_{-\sigma}(t_c, h) = 1,53222 + (-0,03681) \cdot \xi_1 +$ $+ 0,01317 \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} (0,00579 \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot 0,00049 \cdot \xi_1 \xi_2 + (-0,00062) \cdot \xi_2^2) \quad (11)$ <p>Для интервала $t_{c2} = 10,4$ до 20 ч.</p> $k_{-\sigma}(t_c, h) = 1,64000 + (-0,01007) \cdot \xi_1 +$ $+ 0,01258 \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} ((-0,02734) \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot (-0,00044) \cdot \xi_1 \xi_2 + (-0,00033) \cdot \xi_2^2) \quad (13)$	<p>Для интервала $t_{c1} = 0,8$ до $10,4$ ч.</p> $k_{-\sigma}(t_c, h) = 1,27000 + (-0,01389) \cdot \xi_1 +$ $+ 0,00558 \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} (0,00174 \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot 0,00055 \cdot \xi_1 \xi_2 + (-0,00033) \cdot \xi_2^2) \quad (12)$ <p>Для интервала $t_{c2} = 10,4$ до 20 ч.</p> $k_{-\sigma}(t_c, h) = 1,30111 + (-0,00451) \cdot \xi_1 +$ $+ 0,00617 \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} ((-0,01056) \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot (-0,00013) \cdot \xi_1 \xi_2 + (-0,00018) \cdot \xi_2^2) \quad (14)$

ТАБЛИЦА 7. Аппроксимирующие функции k_M для максимальных моментов M



	
<p>Для интервала $t_{c1} = 0,8$ до $10,4$ ч.</p> $k_M(t_c, h) = 0,89444 + 0,02569 \cdot \xi_1 +$ $+ (-0,00700) \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} ((-0,00666) \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot 0,00083 \cdot \xi_1 \xi_2 + 0,00002 \cdot \xi_2^2) \quad (15)$ <p>Для интервала $t_{c2} = 10,4$ до 20 ч.</p> $k_M(t_c, h) = 0,77889 + 0,00382 \cdot \xi_1 +$ $+ (-0,00475) \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} (0,01664 \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot 0,00026 \cdot \xi_1 \xi_2 + (-0,00004) \cdot \xi_2^2) \quad (17)$	<p>Для интервала $t_{c1} = 0,8$ до $10,4$ ч.</p> $k_M(t_c, h) = 0,89556 + 0,02604 \cdot \xi_1 +$ $+ (-0,00708) \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} ((-0,00680) \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot 0,00086 \cdot \xi_1 \xi_2 + 0,00001 \cdot \xi_2^2) \quad (16)$ <p>Для интервала $t_{c2} = 10,4$ до 20 ч.</p> $k_M(t_c, h) = 0,77889 + 0,00382 \cdot \xi_1 +$ $+ (-0,00475) \cdot \xi_2 + \frac{1}{2} (0,01664 \cdot \xi_1^2 +$ $+ 2 \cdot 0,00026 \cdot \xi_1 \xi_2 + (-0,00004) \cdot \xi_2^2) \quad (18)$

ТАБЛИЦА 8. Графики функций $k_{\sigma}(t_c, h)$ для максимальных сжимающих напряжений $-\sigma$ при различных высотах сечения h и периоде цикла t_c

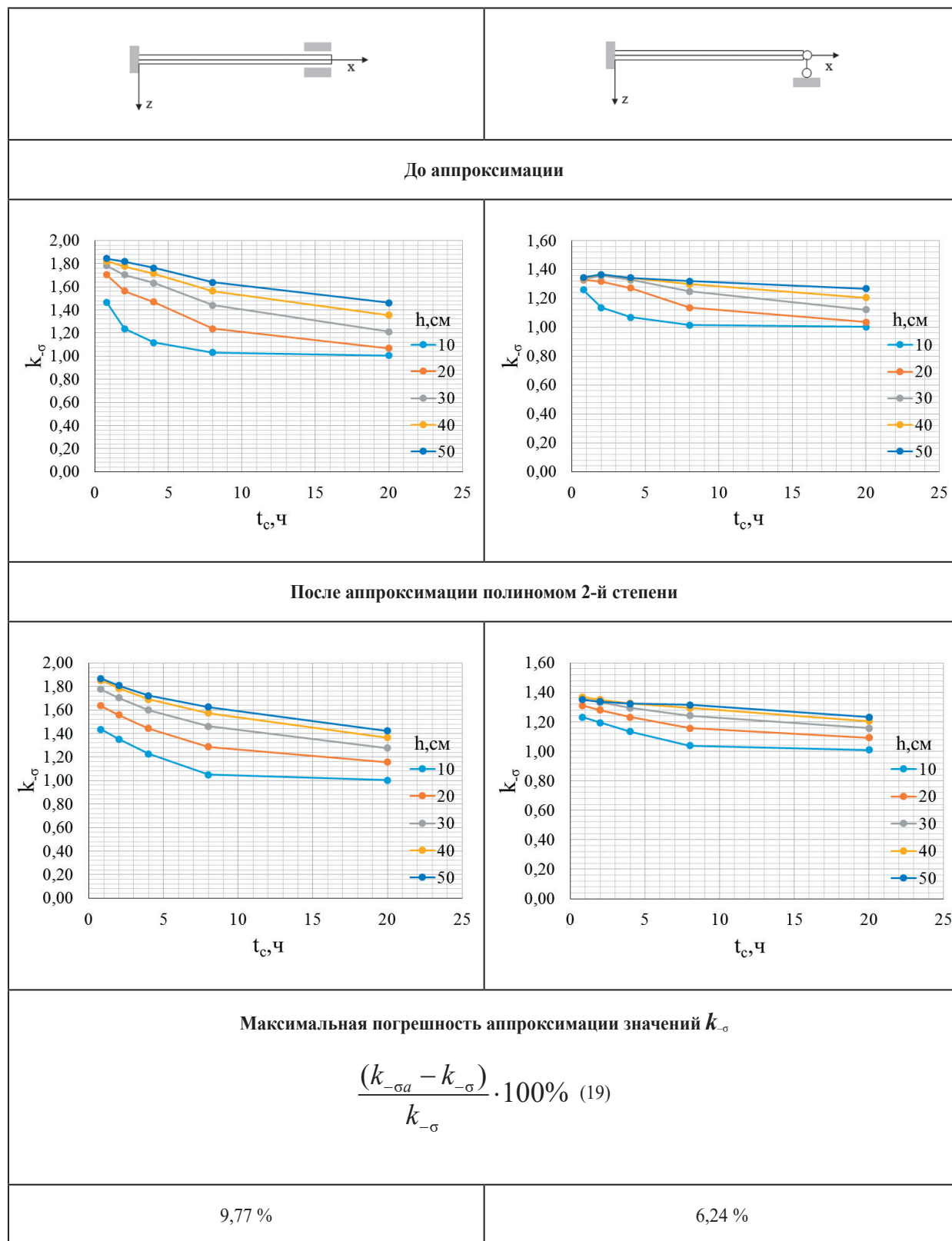


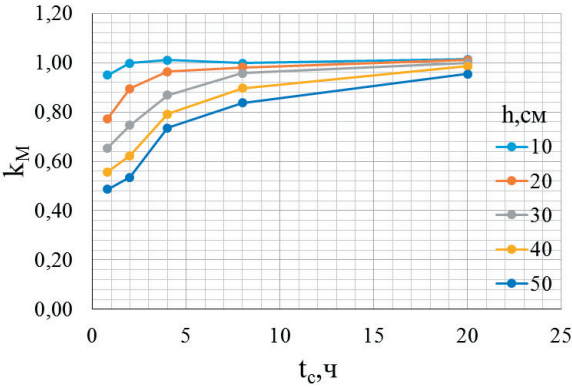
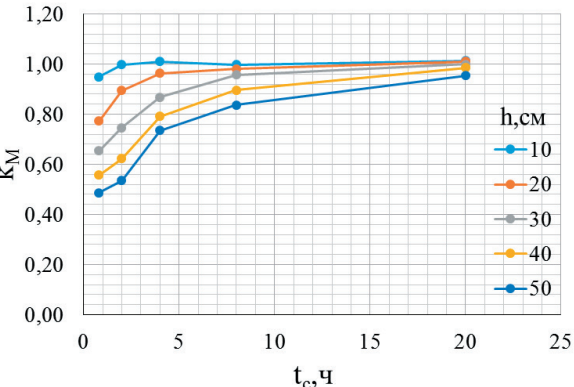
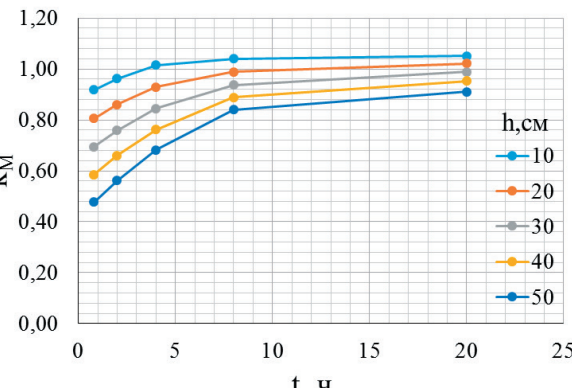
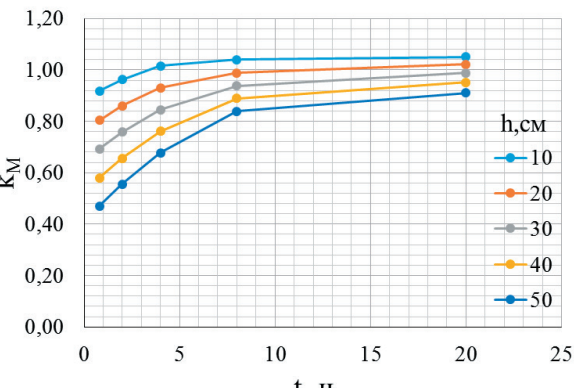


ТАБЛИЦА 9. Графики функций $k_M(t_c, h)$ для максимальных моментов M при различных высотах сечения h и периоде цикла t_c

	
<p>До аппроксимации</p>	
	
<p>После аппроксимации полиномом 2-й степени</p>	
	
<p>Максимальная погрешность аппроксимации значений k_M</p> $\frac{(k_{Ma} - k_M)}{k_M} \cdot 100\% \quad (20)$	
<p>6,84 %</p>	<p>7,17 %</p>

применяться как непосредственно к усилиям или напряжениям, так и к величине перепада температур при неравномерном нагреве. Последний подход имеет значение при расчете стержневых систем на температурные воздействия в программно-вычислительных комплексах, таких как ЛИРА-САПР.

Выводы

1. Значения максимальных напряжений $+\sigma$, $|\sigma|$ и значения максимальных моментов M стремятся к стационарным значениям M_c при увеличении времени цикла t_c и уменьшении высоты сечения стержня h .

2. Максимальные сжимающие напряжения $|\sigma|$ при циклических тепловых воздействиях заметно превышают их величины при установившейся температуре и достигают 35 %.

Полученные аппроксимирующие функции $k_\sigma(t_c, h)$, $k_M(t_c, h)$ для напряжений моментов могут применяться для дальнейшего использования при расчете стержневых систем. Для большей точности можно воспользоваться полученными табличными значениями функции k_M и линейной интерполяцией между этими значениями.

Список источников

1. Шульгин А.А. Исследование напряженного состояния упругого стержня при циклических тепловых воздействиях // Наука и инновации в технических университетах: материалы Тринадцатого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2019. С. 27–28.
2. Pegin P.A., Shulgin A.A. Modern methods for calculating transport infrastructure objects for progressive collapse // BRICS transport. 2023. Vol. 2, iss. 3. P. 6.
3. Шульгин А.А. О некоторых особенностях напряженного состояния упругого стержня при циклическом тепловом воздействии // Современное строительство: сборник статей магистрантов и аспирантов. СПб.: СПбГАСУ, 2019. Т. 1, вып. 2. С. 334
4. Маслов Г.Н. Элементарные статические расчеты сооружений на температурные изменения // Изв. НИИ Гидротехники. 1940. № 26. С. 131–176.
5. Плескачевский Ю.М., Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В. Механика трехслойных стержней и пластин, связанных с упругим основанием. М.: Физматлит, 2011. 560 с.
6. Соппротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г. С. Варданян [и др.]. М.: Инфра-М, 2010.
7. Pegin P.A., Pavlovets A.V. Analysis of the adhesion strength of the a550 reinforcement to concrete B25, B30 and B40 // E3S Web of Conferences. 2024. T. 549. P. 01013.
8. Степин П.А. Соппротивление материалов: учеб. 12-е изд., стер. СПб.: Лань, 2012. 360 с.
9. Колесникова С.И. Методы решения основных задач уравнений математической физики: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2015. 80 с.
10. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч. 1. Упруго-пластические деформации. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
11. Лавров С.С. Аппроксимация функций многих переменных с использованием метода наименьших квадратов // Вычислительная математика и математическая физика. 1964. Т. 4, вып. 3. С. 547–550.
12. Москвитин В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций. М.: Наука, 1981. 344 с.
13. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Боровкова Т.В. Алгоритм решения обобщенной задачи нестационарной теплопроводности в телах простой геометрической формы // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2017. № 1 (112). С. 112–128.
14. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталостную и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 250 с.

15. Клименко Е.С. Устойчивость сжатых неоднородных стержней с учетом физической нелинейности материала: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д., 2011. 112 с.

16. Козельская М.Ю., Чепурненко А.С., Языев С.Б. Расчет на устойчивость сжатых полимерных стержней с учетом физической нелинейности методом конечных элементов // Наукoведение. 2013. Вып. 3.

Дата поступления: 04.10.2025

Решение о публикации: 24.01.2026

Контактная информация:

ПЕГИН Павел Анатольевич — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»;

ppavel.khv@gmail.com

ШУЛЬГИН Алексей Александрович —

аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»;

aleksejshulgin@gmail.com

ПАВЛОВЕЦ Алина Владимировна — магистрант

кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; alin_pavlovets@mail.ru

Determination of maximum support moments and their dependences in statically indeterminate rods subjected to a zero-cycle temperature change

P. A. Pegin, A. A. Shulgin, A. V. Pavlovets

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

For citation: *Pegin P. A., Shulgin A. A., Pavlovets A. V.* Determination of maximum support moments and their dependences in statically indeterminate rods subjected to a zero-cycle temperature change // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 198–208. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-198-208. (In Russian)

Objective: to calculate and analyze sectional stresses and internal forces in the simplest statically indeterminate rods under cyclic temperature changes. **Methods:** two configurations of rod comprising the basic system employed in the displacement method were considered. The first configuration featured one rigidly fixed end and a hinged, movable support at the opposite end; its direct analogue was a rod with a longitudinally sliding fastening at one end and a fixed hinge at the other. The second configuration involved a rigid fixed end combined with a sliding fastening at the opposite end. Both configurations were investigated under a non-zero temperature change cycle. In addition to stresses, the study determined the peak internal forces – particularly bending moments – an outcome not observed for a statically determined rod. **Results:** the magnitudes of the maximum stresses and maximum moments converge to steady-state values as cycle time increases and the rod section height decreases. Maximum compressive stresses under cyclic thermal loading substantially exceed their steady-temperature values, reaching up to 35 % above them. **Practical significance:** the derived approximation functions for moment stresses can be employed in subsequent calculations of core systems. For improved accuracy, the obtained tabulated function values and linear interpolation between them should be used.

Keywords: rod, forces, stresses, temperature, cycle, statics, experiment

References

1. Shul'gin A. A. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya pri tsiklicheskih teplovykh vozdeystviyakh // Nauka i innovatsii v tekhnicheskikh universitetakh: materialy Trinadtsatogo Vserossijskogo foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. SPb., 2019. S. 27–28. (In Russian)
2. Pegin P.A., Shulgin A.A. Modern methods for calculating transport infrastructure objects for progressive collapse // BRICS transport. 2023. Vol. 2, iss. 3. P. 6.
3. Shul'gin A.A. O nekotorykh osobennostyakh napryazhennogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya pri tsiklicheskom teplovom vozdeystvii // Sovremennoe stroitel'stvo: sbornik statej magistrantov i aspirantov. SPb.: SPbGASU, 2019. T. 1, vyp. 2. S. 334. (In Russian)
4. Maslov G.N. Elementarnye staticheskie raschety sooruzhenij na temperaturnye izmeneniya // Izv. NII Gidrotekhniki. 1940. No. 26. S. 131–176. (In Russian)
5. Pleskachevskij Yu. M., Starovojtov E.I., Leonenko D.V. Mekhanika trekhslojnykh sterzhnej i plastin, svyazannykh s uprugim osnovaniem. M.: Fizmatlit, 2011. 560 s. (In Russian)
6. Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti / G. S. Vardanyan [i dr.]. M.: Infra-M, 2010. (In Russian)
7. Pegin P.A., Pavlovets A.V. Analysis of the adhesion strength of the a550 reinforcement to concrete B25, B30 and B40 // E3S Web of Conferences. 2024. T. 549. P. 01013.
8. Stepin P.A. Soprotivlenie materialov: ucheb. 12-e izd., ster. SPb.: Lan', 2012. 360 s. (In Russian)
9. Kolesnikova S.I. Metody resheniya osnovnykh zadach uravnenij matematicheskoy fiziki: ucheb. posobie. M.: MFTI, 2015. 80 s. (In Russian)
10. Il'yushin A.A. Plastichnost'. Ch. 1. Uprugoplasticheskie deformatsii. M.: Gostekhizdat, 1948. 376 s. (In Russian)
11. Lavrov S.S. Approksimatsiya funktsij mnogikh peremennykh s ispol'zovaniem metoda naimen'shikh kvadratov // Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya fizika. 1964. T. 4, vyp. 3. S. 547–550. (In Russian)
12. Moskvitin V.V. Tsiklichesкое nagruzhenie elementov konstruksij. M.: Nauka, 1981. 344 s. (In Russian)
13. Eliseev V.N., Tovstonog V.A., Borovkova T.V. Algoritm resheniya obobshchennoj zadachi nestatsionarnoj teploprovodnosti v telakh prostoj geometricheskoy formy // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie. 2017. No. 1 (112). S. 112–128. (In Russian)
14. Pavlov P.A. Osnovy inzhenernykh raschetov elementov mashin na ustalostnuyu i dlitel'nyuyu prochnost'. L.: Mashinostroenie, 1988. 250 s. (In Russian)
15. Klimenko E.S. Ustoichivost' szhatykh neodnorodnykh sterzhnej s uchetom fizicheskoy nelinejnosti materiala: diss. ... kand. tekhn. nauk. Rostov n/D., 2011. 112 s. (In Russian)
16. Kozel'skaya M. Yu., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B. Raschet na ustojchivost' szhatykh polimernykh sterzhnej s uchetom fizicheskoy nelinejnosti metodom konechnykh elementov // Naukovedenie. 2013. Vyp. 3. (In Russian)

Received: 04.10.2025

Accepted: 24.01.2026

Author's information:

Pavel A. PEGIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of “Building Structures”; ppavel.khv@gmail.com

Alexey A. SHULGIN — Postgraduate Student of the Department of “Building Structures, Buildings and Facilities”; aleksejshulgin@gmail.com

Alina Vlad. PAVLOVETS — Master of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; alin_pavlovec2@mail.ru

УДК 556.043, 556.535.5

Анализ ледового режима реки Пур для определения продолжительности навигационного периода

Н. А. Волкова^{1,2}¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Россия, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Для цитирования: Волкова Н. А. Анализ ледового режима реки Пур для определения продолжительности навигационного периода // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 209–220. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-209-220

Аннотация

Цель: анализ пространственно-временной динамики ледовых явлений на реке Пур с учетом различий между верховьями (район Тарко-Сале) и нижним течением (район Самбурга) для выявления закономерностей и тенденций в условиях меняющегося климата. **Методы:** основаны на обработке многолетних данных (за 1937–2024 годы) о датах начала и окончания ледовых явлений с применением статистического анализа. Используются географические и гидрологические параметры для объяснения различий между пунктами наблюдения. **Результаты:** продолжительность ледового периода в нижнем течении (Самбург) в среднем на 15–20 дней больше, чем в верховьях (Тарко-Сале), из-за более мощного водного потока и влияния арктического климата. Выявлена устойчивая тенденция к сокращению ледового периода на всей протяженности реки, особенно выраженная после 2000 года. При этом пространственный градиент между верховьями и нижним течением сохраняется, несмотря на общее потепление. **Практическая значимость:** возможность использования полученных данных для прогнозирования ледового режима, что важно для планирования судоходства, инфраструктурных проектов и оценки экологических рисков в Арктической зоне. Результаты также вносят вклад в понимание реакции северных рек на климатические изменения.

Ключевые слова: внутренние водные пути, ледовый режим, климатические изменения, река Пур

Введение

В условиях активного освоения Арктической зоны Российской Федерации и наличия значительных запасов природных ресурсов существенно возрастает транспортная роль речных систем Западной Сибири. В связи с этим изучение ледового режима данных водных артерий приобретает особую значимость. Ключевым гидрологическим параметром, определяющим продолжительность судоходства на реках северных регионов, является динамика установления и схода ледового покрова, ока-

зывающая непосредственное влияние на условия навигации.

Река Пур образуется от слияния рек Пяку-Пур и Айваседа-Пур. Площадь бассейна в месте слияния этих рек — 57 500 км² и возрастает к устью Пура до 112 000 км². От истоков реки Пяку-Пур общая длина Пура составляет 1024 км (рис. 1) [1].

Водосборный бассейн реки Пур характеризуется ярко выраженными чертами аккумулятивной равнины с минимальными уклонами поверхности (0,1–0,3%), постепенно

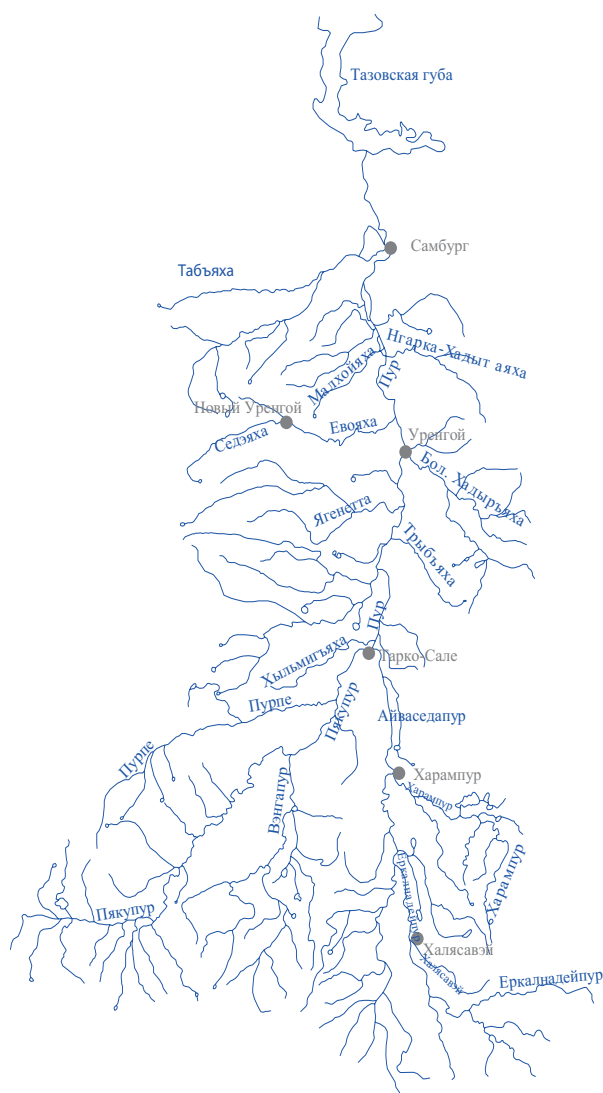


Рис. 1. Гидрографическая сеть бассейна р. Пур (разработана автором)

понижающейся в направлении побережья. Гидрографическая сеть бассейна отличается значительной степенью озерности (до 10% общей площади водосбора) и высокой заболоченностью (до 50% на отдельных участках) [2].

Ландшафтная структура бассейна отличается преобладанием плоских и крупнобугристых болотных массивов, развитой системой пойменных озер и ярко выраженной гидроморфностью ландшафтов. Гидроморфность — это степень выраженности и интенсивности про-

цессов переувлажнения и заболачивания территории, обусловленная близким залеганием грунтовых вод и особенностями рельефа [3].

В настоящее время постоянные наблюдения за уровнем воды в бассейне р. Пур ведутся на постах, представленных в табл. 1.

В колебании уровня воды реки Пур можно выделить следующие фазы: весеннее половодье, кратковременная и неустойчивая летняя межень, незначительные летне-осенние дождевые паводки и зимняя устойчивая низкая межень. Та же картина уровня режима отмечается и на реках Пяку-Пур и Айваседа-Пур. По мере приближения к устью Пура все большее влияние на уровень реки оказывает Тазовская губа, но и здесь основные черты годового хода уровня режима определяются речным стоком.

Река Пур берет начало на Сибирских Увалах на высоте 130–150 м. В верхнем течении речная долина хорошо выражена, ширина ее от 2–3 км постепенно увеличивается до 11 км (район Тарко-Сале). Склоны долины пологие, высотой 10–12 м, сложены песчано-илистыми грунтами и вследствие этого подвержены заметному разрушению. В среднем течении долины рек выражены слабее, склоны постепенно сливаются с окружающей местностью (район Уренгоя).

Пойма в верховьях симметрично двухсторонняя, в среднем течении переходящая в левобережную до 6–9 км шириной. На всем протяжении она сильно изрезана старицами, протоками, ручьями, озерами, значительно заболочена и поросла смешанным лесом, сменяющимся к северу от Самбурга кустарником [3].

Русло реки на всем протяжении песчаное, подверженное значительным деформациям при изменениях скоростного режима потока. В паводковый период на различных участках реки наблюдаются довольно сильные размыв

ТАБЛИЦА 1. Перечень действующих гидрологических (уровенных) постов в бассейне р. Пур

Код поста	Пост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Дата открытия поста	Отметка нуля поста, м БС
11571	р. Пур — пгт Уренгой	244	80 400	07.09.1948	5,86
11574	р. Пяку-Пур — г. Тарко-Сале	2,90	31 400	01.08.1938	15,31
11575	р. Еркал-Надей-Пур — пос. Халесовая	108	6600	27.08.1958	57,85
11636	р. Седэ-Яха — г. Новый Уренгой	4,10	1300	19.07.1984	43,55
11639	р. Хале-Савой — пос. Халесовая	1,50	822	20.08.1985	58,72
11807	р. Пур — с. Самбург	86,0	95 100	07.10.1936	-2,12

и намыв. В русле реки отлагается масса песка, образуя множество песчаных осередков, кос, островов. Паводок сопровождается значительными подъемами воды, превышающими межень на 3,6–4,8 м. Продолжительность разлива, когда вода выходит на пойму, составляет 6–8 дней.

Навигационные условия реки Пур

В настоящее время река Пур от устья до Тарко-Сале является судоходной (табл. 2). По навигационным условиям Пур можно разделить на два участка: верхний — от пос. Тарко-Сале до пгт Уренгой и нижний — от Уренгоя до устья. Верхний участок имеет большое количество перекатов и менее удобен для судоходства, чем нижний. При снижении уровня до межени в средний по водности год на верхнем участке реки насчитывается 14 перекатов с глубинами ниже гарантированных. Характерной особенностью реки на этом участке является незначительная протяженность отдельных перекатов, достигающая 150–200 м при длине плесов 5–7 км. Наиболее затруднительным на верхнем участке является перекат, расположенный на 33 км ниже Тарко-Сале.

По условиям обеспечения безопасности судоходства установлены следующие категории внутренних водных путей для реки Пур [7]:

- внутренние водные пути с гарантированными габаритами судовых ходов и освещаемой навигационной обстановкой (первая категория);
- внутренние водные пути с гарантированными габаритами судовых ходов и со светоотражающей навигационной обстановкой (вторая категория);
- внутренние водные пути без гарантированных габаритов судовых ходов и без навигационной обстановки (седьмая категория).

Нижний участок Пура является более благоприятным для судоходства. Глубины здесь сравнительно одинаковы и удерживаются на уровне гарантированных. Наиболее трудный перекал в многоводные годы находится на 185–187-м километре вниз по течению от Тарко-Сале. В маловодные и средние по водности годы с глубинами меньше гарантированных насчитывается до пяти-шести перекатов [2].

Общее описание ледового режима

Река Пур, как и другие крупные водотоки севера Западной Сибири (Обь, Надым, Таз), характеризуется типичным для этого региона суровым ледовым режимом, формирующимся под действием комплекса климатических, гидравлических и морфологических факторов (рис. 2).

Таблица 2. Категории внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов в навигацию 2025 года [7]

Наименование водного пути	Верхняя граница по течению	Нижняя граница по течению	Протяженность (км)	Категория ВВП	Глубина, м	Ширина, м	Радиус закругления (R), м	Водпост	Проектный уровень воды над «0» графика, см	Дата открытия (дд.мм.гг)	Дата закрытия (дд.мм.гг)	Продолжительность, дней
Река Пяку-Пур	85 км	14 км	71	7								
Река Айваседа-Пур	171 км	устье (слияние с р. Пяку-Пур)	171	7								
Река Еркал-Надей-Пур	с. Халясавэй	устье (р. Айваседа-Пур)	113	7								
Река Пур	исток (слияние рек Пяку-Пур и Айваседа-Пур)	г. Уренгой	138	7								
Река Пур	г. Уренгой	6 км	256	2	1.2	30	200	Уренгой	360	12.06.2025	01.10. 2025	112
Река Пур	6 км	устье (Тазовская губа)	6	1	2.1	40	200	Находка	650	28.06.2025	01.10.2025	96

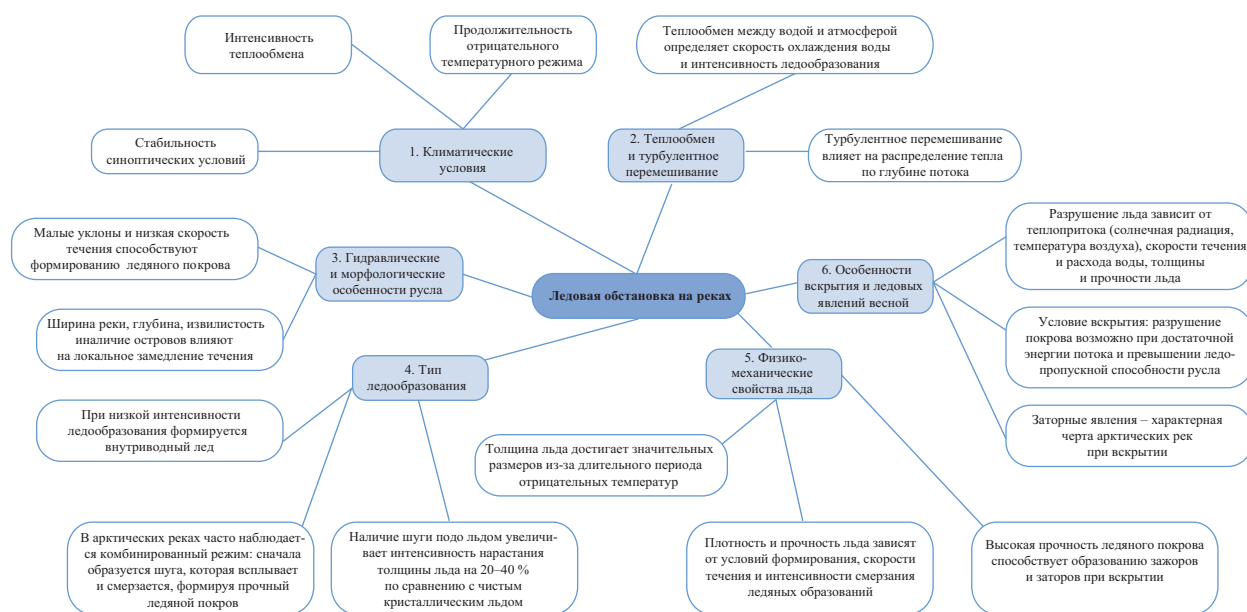


Рис. 2. Схема факторов, определяющих ледовый режим (разработана автором)

Ледовый режим реки Пур формируется в условиях сурового арктического климата, что определяет его основные фазы: раннее замерзание, длительный ледостав и позднее, бурное вскрытие. Реки севера Западной Сибири замерзают в октябре-ноябре и находятся подо льдом в течение 7–8 месяцев [9]. Для этих рек характерны интенсивное шугообразование, значительная толщина льда и заторные явления при вскрытии. Река Пур, протекающая в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа, полностью соответствует этой обобщенной характеристике. Суровые метеорологические условия, включающие раннее и устойчивое понижение температуры воздуха, способствуют интенсивным теплопотерям с поверхности воды, что приводит к переохлаждению водной толщи и началу ледообразования.

Учитывая, что Пур — равнинная река с широкой поймой и относительно низкими уклонами, на ее участках с более высокой скоростью течения (особенно в верховьях и на перекатах) происходит интенсивное образование внутриводной шуги. Эта шуга, всплывая, накапливается и формирует шуговые ковры и венки, которые затем смерзаются, способствуя быстрому установлению сплошного ледяного покрова. На участках с малой скоростью течения ($< 0,2$ м/с) ледостав формируется за счет роста и смыкания заберегов. Наличие подледной шуги значительно ускоряет нарастание толщины льда, увеличивая ее на 20–40% по сравнению с чистым кристаллическим льдом.

Вскрытие реки Пур, как и других арктических рек, сопровождается высокой вероятностью заторообразования. Заторные явления являются характерной чертой вскрытия рек Сибири [9], где ледяной покров отличается большой толщиной и прочностью. Разрушение покрова происходит, когда энергия потока (определяемая расходом воды и скоростью

течения) превышает ледопрopusкную способность русла. На реке Пур, имеющей извилистое русло и участки сужения, условия для формирования заторов особенно благоприятны. Процесс вскрытия проходит с динамическим разрушением льда под действием паводочной волны. Это приводит к резкому подъему уровня воды, который может превышать максимальные уровни весеннего половодья, что создает угрозу подтопления прибрежных территорий. Условием начала вскрытия является достижение критического значения числа Фруда ($Fr_{кр} \approx 0,08–0,15$), при котором ледяной покров теряет устойчивость.

В настоящее время ледовый режим реки Пур может испытывать антропогенное влияние. Бассейн реки активно осваивается в нефтегазодобывающей отрасли. Строительство инфраструктуры, транспортных коридоров и возможное регулирование стока на притоках могут локально нарушать естественные гидрологические и термические условия. Соответственно, могут образовываться участки с неустойчивым ледовым режимом и меняться сроки замерзания и вскрытия.

Анализ дат начала ледовых явлений

При анализе дат начала ледовых явлений (табл. 3, рис. 3) на реке Пур в створах Тарко-Сале (верховья), Уренгой (среднее течение) и Самбург (низовья, замыкающий створ), а также с учетом общих закономерностей ледового режима арктических рек можно сделать следующие выводы о пространственно-временной динамике замерзания Пура.

В створе Тарко-Сале замерзание в среднем начинается 13 октября, крайние значения лежат в диапазоне от 28 сентября до 30 октября. Самые ранние сроки наблюдались в 1992 и 1981 годах (28 и 29 сентября соответственно), самые поздние — в 1944 (30 октября), 2011 и 2022 годах (27 октября) годах.

ТАБЛИЦА 3. Обобщенные характеристики дат начала ледовых явлений по постам за период наблюдений

Характеристика	Тарко-Сале	Уренгой	Самбург
Период наблюдений	1938–1943, 1944–1945, 1947–2023	1948–2023	1937–1991, 2000–2001, 2004, 2006, 2008–2023
Средняя дата	13 октября	11 октября	10 октября
Ранняя	28 сентября	28 сентября	26 сентября
Поздняя	30 октября	26 октября	27 октября

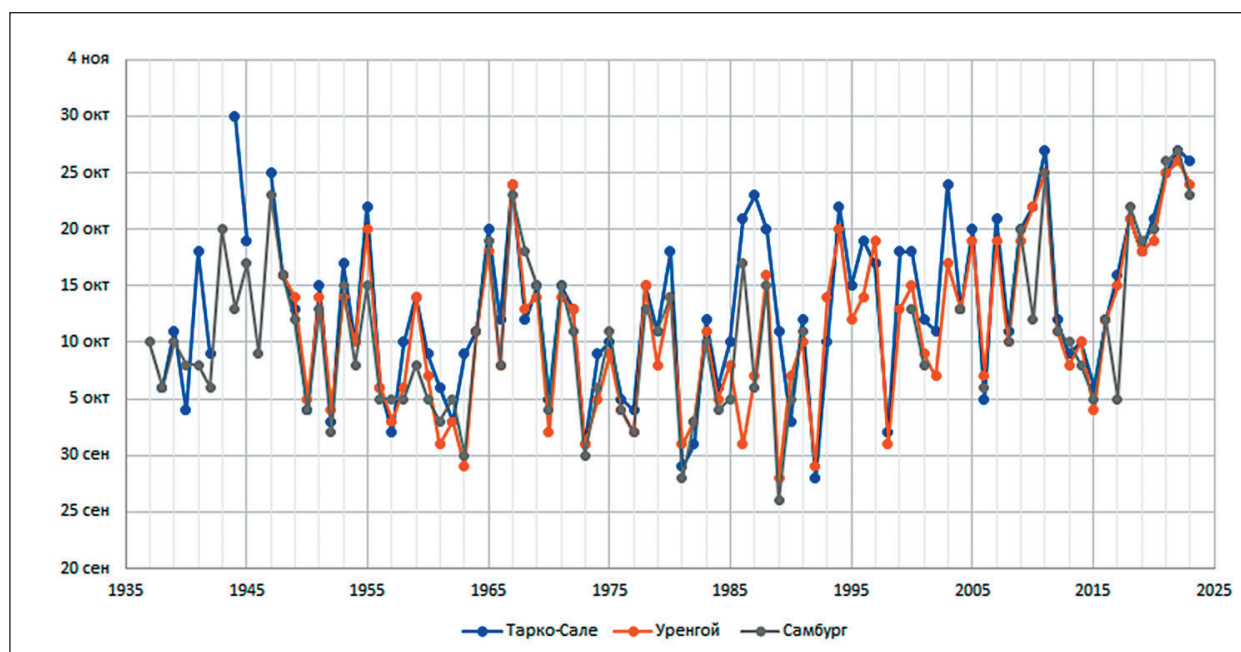


Рис. 3. Хронологический ход дат начала ледовых явлений (разработан автором)

В створе Уренгой даты варьируются от 28 сентября до 26 октября с наиболее ранними сроками в 1989 (28 сентября), 1963 и 1992 (29 сентября) годах и самыми поздними в 2022 (26 октября), 2011 и 2021 (25 октября) годах.

В замыкающем створе Самбург есть данные не за все годы, однако и имеющийся ряд составляет 75 значений, и по ним можно сделать основные выводы. Замерзание происходит с 26 сентября по 27 октября с ранними сроками в 1989 году (26 сентября) и поздними в 2022 (27 октября) году.

При сравнении средних значений видно, что замерзание в низовьях (Самбург) начи-

нается на три дня раньше, чем в верховьях (Тарко-Сале), что соответствует географической зональности.

В среднем изменчивость сроков ледовых явлений на реках Западной Сибири составляет 7–8 суток [9]. Анализ данных по реке Пур показывает, что разброс дат в каждом створе значительно превышает это значение. Например, в Тарко-Сале разница между самой ранней (28 сентября) и самой поздней (30 октября) датами составляет 32 дня. Это свидетельствует о высокой чувствительности ледового режима Пура к годовым колебаниям метеорологических условий (температура воздуха, скорость

ветра, облачность) и гидрологического режима (расход воды, скорость течения, влияние при-токов). В отдельные годы (например, в 1986-м) наблюдается аномально позднее появление ледовых явлений в верховьях (21 октября) при относительно раннем в среднем течении (1 октября), что может быть связано с конкретными гидрометеорологическими ситуациями.

После 2000 года участились случаи ледообразования во второй половине октября (особенно в 2021–2023 годах) из-за влияния глобального потепления.

Анализ дат окончания ледовых явлений

Устье Пура находится в более высоких широтах, где весеннее потепление наступает позже, чем в более южных, континентальных районах. Сроки вскрытия рек зависят от широты, толщины льда, расхода воды и морфологии русла [9]. В естественных условиях вскрытие, как правило, начинается в среднем течении или в низовьях, где ледовый покров тоньше и подвержен большему тепловому воздействию. Однако для Пура эта закономерность нарушается из-за географического положения и течения с юга на север.

При анализе дат окончания ледовых явлений (табл. 4, рис. 4) видно, что в створе Тарко-Сале окончание ледовых явлений находится в диапазоне от 7 мая до 14 июня. Самые ранние сроки наблюдались в 2020 и 1995 годах (7 и 8 мая соответственно), самые поздние — в 1981 (14 июня) и 1972 (12 июня) годах.

В створе Уренгой даты варьировались от 12 мая до 16 июня с наиболее ранними сроками в 2020 (12 мая), 1997 (15 мая) годах и самыми поздними в 1981 (16 июня), 1961, 1970, 1972 (14 июня) годах.

В замыкающем створе Самбург окончание ледовых явлений происходило с 15 мая по 22 июня с ранними сроками в 2020 году (15 мая) и поздними в 1981 (22 июня) году.

В большинстве годов окончание ледовых явлений в Самбурге происходит на 5–10 дней позже, чем в Тарко-Сале, что объясняется более северным расположением (холоднее) и большим объемом воды в низовьях, требующим больше времени для прогресса.

Весной 2020 года разница в датах составила всего 8 дней (7 мая в Тарко-Сале, 15 мая в Самбурге), что может указывать на аномально теплую весну.

Вскрытие реки Пур начинается в верховьях (район Тарко-Сале) и заканчивается в устьевой области (Самбург) из-за совокупности географических и климатических факторов. В верховьях реки, где водный поток менее мощный, а глубина меньше, ледовый покров прогревается быстрее под воздействием весеннего повышения температур. Кроме того, верховья расположены южнее, что способствует более раннему таянию снега и льда. В низовьях, напротив, больший объем воды, замедленный прогрев из-за северного положения, а также влияние холодных арктических воздушных масс приводят к более позднему

ТАБЛИЦА 4. Обобщенные характеристики дат окончания ледовых явлений по постам за период наблюдений

Характеристика	Тарко-Сале	Уренгой	Самбург
Период наблюдений	1939–1945, 1947–2024	1949–2024	1938–1993, 2004–2023
Средняя дата	29 мая	2 июня	9 июня
Ранняя	7 мая	12 мая	15 мая
Поздняя	14 июня	16 июня	22 июня

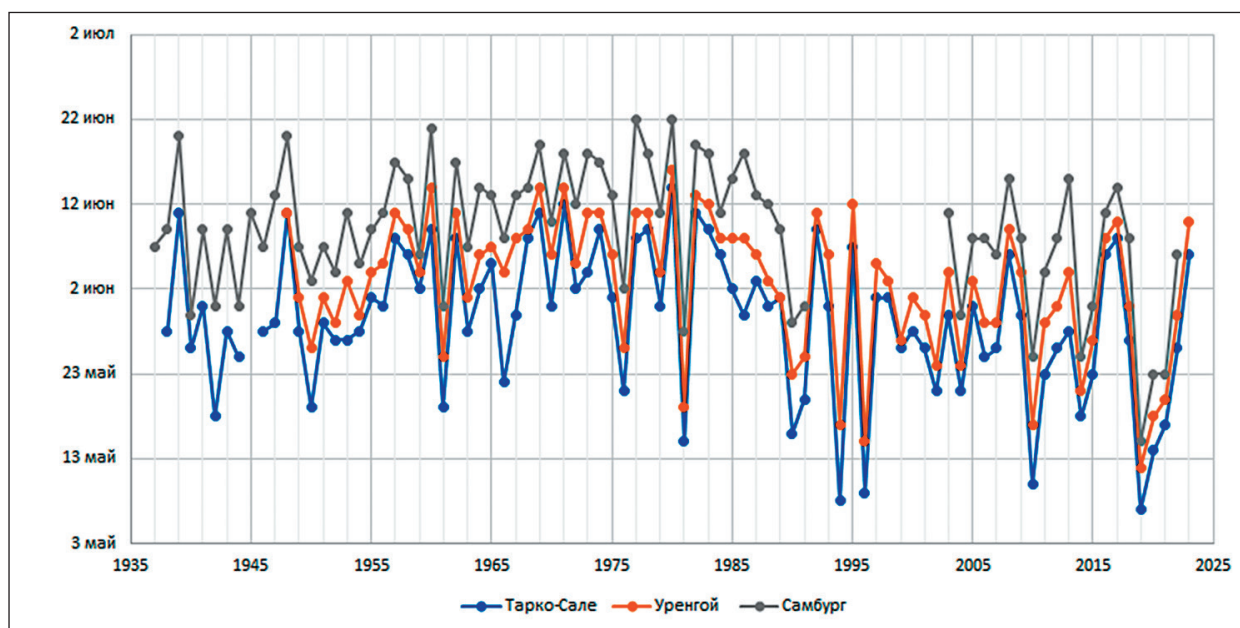


Рис. 4. Хронологический ход дат окончания ледовых явлений (разработан автором)

вскрытию. Это явление характерно для многих северных рек и объясняется закономерностями теплообмена в речных системах.

Анализ данных показывает, что разница в сроках вскрытия между верховьями и нижним течением может достигать 10–15 дней, что особенно заметно в годы с затяжной весной. В последние десятилетия наблюдается тенденция к сокращению этого временного разрыва, вероятно, из-за общего потепления климата, которое ускоряет таяние льда даже в северных районах. Однако географический градиент сохраняется: более раннее вскрытие в верховьях и позднее в устьевой области остаются устойчивой закономерностью.

Анализ продолжительности ледовых явлений

Ледовый режим реки Пур характеризуется значительной пространственной изменчивостью, обусловленной различиями в гидрологических и климатических условиях между верховьями (район Тарко-Сале) и нижним те-

чением (район Самбурга). В верховьях, где река имеет меньшую водность и более подвержена влиянию континентального климата, ледовые явления начинаются раньше, но и заканчиваются быстрее. В нижнем течении, напротив, из-за большего объема воды, замедленного теплообмена и близости к арктическому побережью ледостав формируется позже, а вскрытие происходит значительно позднее. В результате общая продолжительность ледового периода в Самбурге в среднем на 15–20 дней больше, чем в Тарко-Сале. Например, в 1977–1978 годах разница составила 20 дней (ледовый период в Тарко-Сале завершился 8 июня, а в Самбурге — 22 июня).

Анализ многолетних данных выявляет устойчивую тенденцию к сокращению продолжительности ледовых явлений на всей протяженности реки (табл. 5, рис. 5), однако пространственный градиент между верховьями и низовьями сохраняется. В последние десятилетия (2000–2024 годы) средняя длительность ледового покрова в Тарко-Сале уменьшилась

ТАБЛИЦА 5. Обобщенные характеристики продолжительности ледовых явлений по постам за период наблюдений

Характеристика	Тарко-Сале	Уренгой	Самбург
Период наблюдений	1938–1943, 1944–1945, 1947–2023	1948–2023	1937–1991, 2000–2001, 2004, 2006, 2008–2023
Средняя продолжительность	229	235	243
Наименьшая	199	207	209
Наибольшая	255	256	264

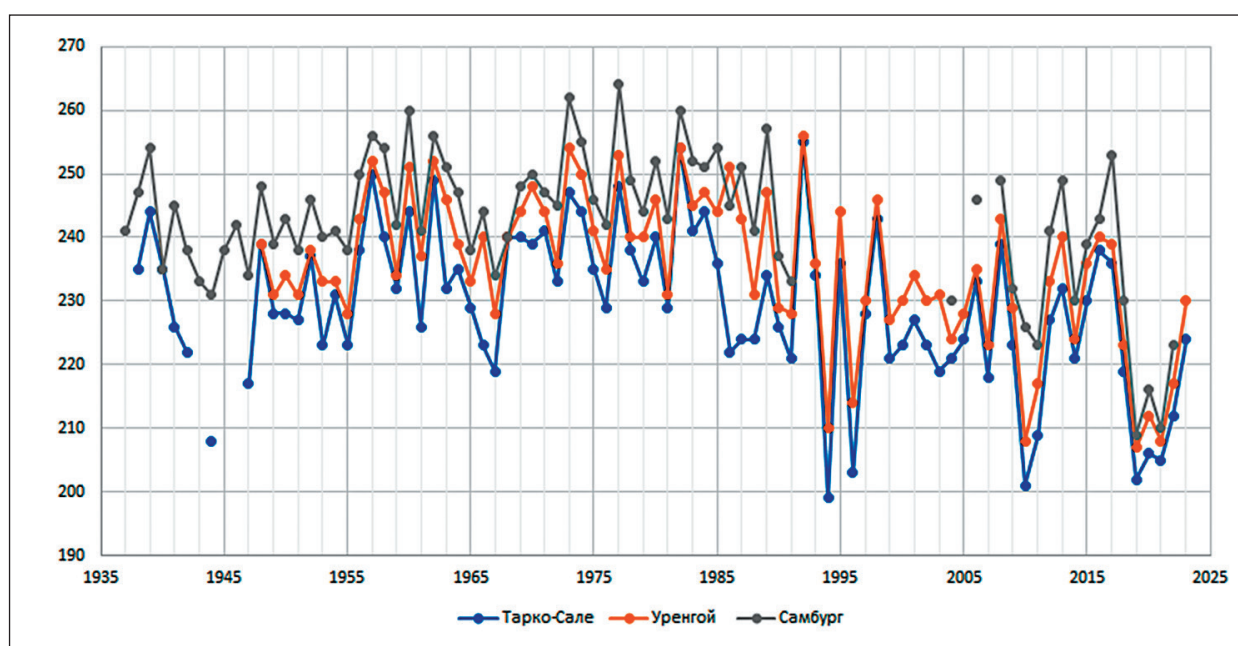


Рис. 5. Хронологический ход продолжительности ледовых явлений (разработан автором)

до 200–210 дней, тогда как в Самбурге она по-прежнему составляет 215–225 дней. Это связано с тем, что, несмотря на общее потепление, нижнее течение остается более чувствительным к низким температурам из-за затяжного весеннего ледохода и более позднего прогрева водных масс. Кроме того, в отдельные годы (например, 2019–2020-е) аномально раннее вскрытие в верховьях (уже в начале мая) привело к рекордному сокращению ледового периода, но в Самбурге даже в такие годы лед сохраняется до середины мая.

Наблюдаемые изменения ледового режима реки Пур согласуются с глобальными климатическими трендами, но их пространственная неоднородность подчеркивает важность учета локальных факторов, таких как морфометрия русла, водность и удаленность от арктического побережья. Дальнейшие исследования должны быть направлены на моделирование этих процессов с учетом прогнозируемого роста температур, что особенно актуально для оценки устойчивости транспортной инфраструктуры и экосистем в условиях меняющегося климата.

Заключение

Ледовый режим реки Пур является типичным для арктических рек Западной Сибири: он характеризуется длительным и мощным ледоставом, интенсивным шугообразованием и высокой опасностью заторных явлений при вскрытии. Его особенности определяются суровым климатом, равнинным рельефом и гидравлическими характеристиками потока, что делает его устойчивым в естественных условиях, но потенциально уязвимым к техногенным воздействиям.

Проведенный анализ ледового режима реки Пур за 1938–2024 годы позволил выявить ключевые закономерности формирования и разрушения ледового покрова в различных частях речной системы. Установлено, что продолжительность ледовых явлений демонстрирует четкую географическую зависимость: в нижнем течении (Самбург) ледовый период в среднем на 15–20 дней длиннее, чем в верховьях (Тарко-Сале), что обусловлено сочетанием гидрологических и климатических факторов.

Высокая изменчивость сроков начала ледовых явлений, превышающая средние показатели для Западной Сибири, указывает на сложный баланс между климатическими колебаниями и гидрологическими условиями, что делает прогнозирование ледового режима на Пуре особенно важным для хозяйственной деятельности в регионе.

Наблюдаемая в последние десятилетия тенденция к сокращению продолжительности ледового периода на всей протяженности реки свидетельствует о заметном влиянии климатических изменений на гидрологический режим арктических рек. Особенно показательным является сокращение разницы в сроках ледохода между верховьями и низовьями в аномально теплые годы. Полученные результаты имеют важное значение для разработки адаптацион-

ных мер в условиях меняющегося климата, особенно для транспортной инфраструктуры и хозяйственной деятельности в регионе.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение прогнозных моделей ледового режима с учетом современных климатических трендов. Особо следует уделить внимание мониторингу экстремальных гидрологических ситуаций, частота которых, согласно полученным данным, имеет тенденцию к увеличению.

Также проведенное исследование ледового режима реки Пур имеет важное практическое значение для нормативного регулирования сроков навигации. Полученные данные о пространственно-временной динамике ледовых явлений позволяют повысить точность установления периодов судоходства в нормативных документах, таких как распоряжения Росморречфлота [7].

Список источников

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 15, вып. 3. Л.: Гидрометеоздат, 1964.
2. Соловьева З.С. Уровненный режим р. Пур // Труды ААНИИ. Т. 297. Проблемы гидрологии устьевых областей сибирских рек. Л.: Гидрометеоздат, 1972. С. 92–103.
3. Всеволожский В.А., Павлова К.К. Особенности формирования подземного питания рек Пурского района // Тр. Гос. гидрол. ин-та. Л., 1964. Вып. 114.
4. Кочеткова Е.Д. Пространственно-временная изменчивость метеорологических элементов на юго-востоке Обской губы // Азимут геонаук: материалы Всероссийской междисциплинарной молодежной научной конференции (Томск, 6–9 декабря 2022 года). Вып. 3. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2023. С. 244–249.
5. Гидрологический ежегодник. Т. 6, вып. 0–9. Л.: Гидрометеоздат, 1936–2012.

6. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 30.06.2025).

7. Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2025 года: распоряжение Росморречфлота от 27.12.2024 № АТ-531-р.

8. Волкова Н. А. Подход к прогнозированию гидрологических явлений в Арктической зоне Российской Федерации и пути повышения достоверности прогнозов в условиях изменения климата // Гидротехника. 2024. № 4 (77). С. 21–27.

9. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 242 с.

10. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 446–459.

11. Опыт применения вероятностных подходов при прогнозировании уровня режима реки Мармарик / А. Э. Сумачев [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 516, № 2. С. 662–670.

Дата поступления: 22.11.2025

Решение о публикации: 24.01.2026

Контактная информация:

ВОЛКОВА Надежда Александровна — канд. физ.-мат. наук; navolkova@aari.ru.

Assessing the Pur River freeze-thaw cycles to determine the length of its navigation season

N. A. Volkova^{1,2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya st., Saint Petersburg, 193007, Russia

² Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa st., Saint Petersburg, 199397, Russia

For citation: *Volkova N.A.* Assessing the Pur River freeze-thaw cycles to determine the length of its navigation season // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 209–220. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-209-220. (In Russian)

Abstract

Objective: to analyze the spatiotemporal dynamics of ice-thaw cycles on the Pur River, contrasting the upper reach (Tarko-Sale) with the lower reach (Samburg), in order to identify patterns and trends relevant to climate change. **Methods:** long-term records of 1937-2024 of ice onset and breakup dates were analyzed using statistical techniques. Geographical and hydrological parameters of the observation sites were incorporated to account for intersite observation points. Results: On average, the ice period in the lower reach (Samburg) is 15-20 days longer than that in the upper reach (Tarko-Sale), a difference linked to stronger river flow and greater Arctic climate influence. A persistent shortening of the river ice season has been detected, with the trend becoming particularly pronounced since 2000. At the same time, a spatial gradient between the upper and lower reaches persists despite the overall warming. **Practical significance:** the study's practical value lies in the potential application of the obtained data to predict the ice season, which is important for planning shipping, infrastructure projects and assessing environmental risks in the Arctic zone. The findings also advance the understanding of how northern rivers react to climate change.

Keywords: inland waterways, ice season, climate change, Pur River

References

1. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 15, vyp. 3. L.: Gidrometeoizdat, 1964. (In Russian)
2. Solov'eva Z. S. Urovennyj rezhim r. Pur // Trudy AANII. T. 297. Problemy gidrologii ust'evykh oblastej sibirskikh rek. L.: Gidrometeoizdat, 1972. S. 92–103. (In Russian)
3. Vsevolozhskij V.A., Pavlova K.K. Osobennosti formirovaniya podzemnogo pitaniya rek Purskogo rajona // Tr. Gos. gidrol. in-ta. L., 1964. Vyp. 114. (In Russian)
4. Kochetkova E.D. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' meteorologicheskikh elementov na yugovostoke Obskoj guby // Azimut geonauk: materialy Vserossijskoj mezhdistsiplinarnoj molodezhnoj nauchnoj konferentsii (Tomsk, 6–9 dekabrya 2022 goda). Vyp. 3. Tomsk: Izd-vo Tomskogo TsNTI, 2023. S. 244–249. (In Russian)
5. Gidrologicheskij ezhegodnik. T. 6, vyp. 0–9. L.: Gidrometeoizdat, 1936–2012. (In Russian)
6. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (data obrashcheniya 30.06.2025). (In Russian)
7. Ob ustanovlenii kategorij vnutrennikh vodnykh putej, opredelyayushchikh dlya uchastkov vnutrennikh vodnykh putej gabarity sudovykh khodov i navigatsionno-gidrograficheskoe obespechenie uslovij plavaniya sudov, perechen' sudovykh khodov, a takzhe sroki raboty sredstv navigatsionnogo oborudovaniya i sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij v navigatsiyu 2025 goda: rasporyazhenie Rosmorrechflota ot 27.12.2024 No. AT-531-r. (In Russian)
8. Volkova N.A. Podkhod k prognozirovaniyu gidrologicheskikh yavlenij v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federatsii i puti povysheniya dostovernosti prognozov v usloviyakh izmeneniya klimata // Gidrotekhnika. 2024. No. 4 (77). S. 21–27. (In Russian)
9. Donchenko R. V. Ledovyj rezhim rek SSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 242 s. (In Russian)
10. Sumachev A.E., Banshchikova L.S. Ledovyj rezhim reki Pechora i osobennosti prognozirovaniya vysshego urovnya ledokhoda // Gidrometeorologiya i ekologiya. 2020. No. 61. S. 446–459. (In Russian)
11. Opyt primeneniya veroyatnostnykh podkhodov pri prognozirovanii urovennogo rezhima reki Marmarik / A. E. Sumachev [i dr.] // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle. 2024. T. 516, no. 2. S. 662–670. (In Russian)

Received: 22.11.2025

Accepted: 24.01.2026

Author's information:

Nadezhda A. VOLKOVA — PhD in Physics and Mathematics; navolkova@aari.ru

УДК 624.138.24

Искусственное воздействие на грунты с целью изменения их свойств на примере строительства Северомуйского тоннеля

С. Л. Филиппов

Общество с ограниченной ответственностью «Полиэко», Россия, 600020, Владимир, ул. Линейная, 3, пом. 8

Для цитирования: Филиппов С. Л. Искусственное воздействие на грунты с целью изменения их свойств на примере строительства Северомуйского тоннеля // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 221–228. DOI:10.20295/1815-588X-2026-1-221-228

Аннотация

Цель: исследование механизмов инъекционного упрочнения грунтов зон разломов с точки зрения происходящих при этом физико-химических процессов в условиях, характеризующихся высокой дезинтегрированностью грунтов, их обводненностью, высокими значениями гидростатического давления. **Методы:** рассмотрены теоретические модели инъекционного упрочнения неустойчивых, раздробленных до дресвы, песка и глины грунтов методом инъекции в режиме фильтрации, а также инъекционным упрочнением грунтов при консолидированном уплотнении (метод гидроразрыва). **Результаты:** закрепление грунтов позволяет обеспечить прогнозируемое поведение массива грунта по трассе тоннеля, получить новые улучшенные характеристики грунта и использовать их в дальнейших расчетах армогрунтовых конструкций. Рассмотрен механизм инъекционного упрочнения грунтов, представляющий собой комплексное воздействие твердеющих во времени инъекционных растворов на пути своего движения под действием избыточного давления по схеме «инъекционная скважина => естественные трещины и крупные поры => искусственные трещины и каналы => мелкие поры». **Практическое применение:** указанные в статье методы являются основными разработками и получили широкое применение для эффективного искусственного воздействия на дезинтегрированные неустойчивые грунты путем обработки инъекционными растворами с целью улучшения свойств. Способы инъекционного упрочнения грунтов (в различных вариантах) применены на тоннелях БАМа более чем на 150 разломах различной мощности и протяженности.

Ключевые слова: инъекция, фильтрация, закрепление, грунты, деформации

Введение

В забайкальской части трассы БАМа, где располагаются Северомуйский тоннель и тоннели трассы обхода, развиты два основных комплекса: коренные метаморфические и изверженные породы, представленные гранитами и гранитоидами, реже гранодиоритами. Коренные породы покрывают песчано-галечниковые породы плейстоцена и голоцена, представленные галечниками, песками, супесями, реже суглинками и глинами с растительными

остатками. Образовавшиеся в результате тектогенеза многочисленные разломы заполнены этими структурами, которые обводнены и превращены геотектоническими и гидротермальными процессами физического и химического выветривания в дресвяно-песчано-глинистую массу. Цементирующим материалом является тектоническая мука, до которой были перетерты граниты в результате тектонических напряжений и смещений блоков. Песчано-дресвяный материал и присутствие глинистой фракции

в условиях обводнения способствуют образованию грунта плавунного типа. Наличие в теле разломов интервалов дресвяно-щебневой размерности с незначительным количеством глинистой фракции создает каналы, обладающие высокой водопроницаемостью. При проходке выработок в таких каналах возникали водотоки, обладающие высокими скоростями и большой разрушающей способностью с расходом до 5800 м³/ч. А при прорывах подземных вод притоки воды из забоя, например штольни, достигали значений нескольких тысяч м³/ч, объем вынесенного рыхлого материала — в 3–5 тыс. м³. Первоначальный напор подземных вод достигал значения 5 МПа. В этих условиях без применения специальных способов работ сооружение тоннеля оказалось невозможным.

В настоящей статье рассматривается инъекционное упрочнение грунтов в качестве базового метода их искусственной стабилизации для улучшения условий строительства.

Работа по закреплению грунтов тоннелей БАМа выполнялась под научным руководством В. Е. Меркина во Всесоюзном научно-исследовательском институте транспортного строительства (ЦНИИС), при активном участии специалистов ОАО «Ленметрогипротранс» Н. И. Кулагина, К. П. Безродного, А. И. Салана, А. Г. Мацегоры, коллективами тоннельных отрядов УС «Бамтоннельстрой» под руководством главного инженера Р. И. Касапова.

Инъекция грунтов как способ воздействия нашла широкое применение в транспортном, гидротехническом, шахтном, промышленном и гражданском строительстве и других областях народного хозяйства. Этот способ применяется для укрепления грунтов и создания противофильтрационных экранов.

Специалисты в области инъекции грунтов разделяют этот процесс в теоретическом плане на две основные разновидности:

- инъекция в режиме фильтрации (пропитка);
- инъекция в режиме гидравлических разрывов грунтового массива.

Инъекция в режиме фильтрации

Может осуществляться как в однородные проницаемые и изотропные, так и в неоднородные проницаемые грунты. При нагнетании инъекционного раствора в однородные изотропные грунты, имеющие коэффициент фильтрации k , при давлении P_H в последних возникает радиальное течение. При установившемся движении процесс может быть представлен известным уравнением [1]:

$$P_H - p = \frac{Qg\gamma}{Ck_0g_0}, \quad (1.1)$$

где p — давление грунтовых вод;

Q — скорость нагнетания инъекционного раствора;

g — вязкость раствора;

γ — удельный вес раствора;

C — коэффициент, зависящий от формы полости, через которую нагнетают в грунт раствор;

k_0 — коэффициент фильтрации грунта для воды;

g_0 — вязкость воды.

В природе однородные и изотропные грунты встречаются крайне редко и являются, скорее всего, исключением. Как правило, природные массивы состоят из различных грунтов: песков с различными размерами зерен — от пылеватых до крупнозернистых, супесей, суглинков, которые могут содержать гальку, гравий и валуны и которые сильно различаются по проницаемости.

В слоистых структурах с различной проницаемостью раствор при инъекции проникает сначала в более проницаемые слои — до того момента, когда проницаемость последних не

станет ниже проницаемости остальных слоев. После этого раствор начинает проникать в менее проницаемый слой и т. д.

В этом случае для описания течения инъекционного раствора можно использовать уравнение Дюпюи:

$$P_H - p = \frac{Q\gamma g}{2\pi k_o g_o m_i} \ln \frac{R}{r_c}, \quad (1.2)$$

где m_i — мощность i -го слоя;

R — радиус влияния;

r_c — радиус инъекционной скважины.

Из выражений (1.1), (1.2) видно, что давление инъекции должно быть тем выше, чем ниже коэффициент фильтрации инжецируемой среды и выше вязкость раствора, применяемого для инъекции, а также чем меньше мощность инжецируемого слоя грунта.

Несложные расчеты и практика инъекционных работ показывают, что инжецирование слоя грунта с высокой проницаемостью, но малой мощности может потребовать применения таких высоких давлений, при которых произойдет разрыв менее проницаемых слоев. А так как мощность слоев и давление без ущерба для качества инъекционных работ снизить нельзя, то снизить давление можно только уменьшением вязкости инъекционного раствора или снижением скорости его нагнетания.

Без снижения давления инжецирование грунтовых слоев возможно лишь в том случае, если каждый слой инжецировать отдельно, для чего необходимо грунтовые слои разобщить, что обеспечивается применением инъекционной манжетной технологии.

Как показала практика инъекционных работ, при инжецировании анизотропных трещиноватых скальных грунтов с несколькими системами трещин для обеспечения высокого качества инжецирования необходимо применение высоких давлений нагнетания, которые

расчетным путем могут быть получены из уравнения Н. В. Тябина:

$$P_H - p = \frac{3Q\eta \ln \frac{R_p}{r_c}}{4\pi h^3} + \frac{3\tau_o (R_p - r_c)}{2h}, \quad (1.3)$$

где Q — скорость нагнетания инъекционного раствора;

η — структурная вязкость инъекционного раствора;

R_p — радиус распространения инъекционного раствора;

r_c — радиус инъекционной скважины;

$2h$ — величина раскрытия трещин в скальных грунтах;

τ_o — динамическое напряжение сдвига инъекционного раствора.

Применение высоких давлений при инжецировании скальных трещиноватых грунтов по многочисленным наблюдениям автора приводят к следующему интересному явлению: под воздействием высоких давлений стенки инжецируемой трещины раздвигаются, раскрытие и протяженность ее увеличиваются — происходит так называемое гидрорасчленение скальных грунтов, при этом из-за упругости горного массива трещины, в которые не попал инъекционный раствор, закрываются.

По окончании инжецирования в результате действия упругих сил грунтов трещины, в которые не проник инъекционный раствор, открываются снова. Для их заполнения нужно повторное инжецирование раствора, обладающего более высокой проникающей способностью (вторая стадия), что производителями работ, как правило, не делалось. В процессе вскрытия инжецированных зон это приводило к получению остаточных водопритоков, величины которых значительно превышали нормы действующих СП. Это вызывало необходимость выполнения дополнительных объемов

инъекционных работ, что неблагоприятно влияло на весь ход строительства объектов: необоснованно увеличивалась стоимость работ, замедлялись темпы строительства.

При строительстве сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, например при проходке горных тоннелей Байкало-Амурской железнодорожной магистрали по тектонически нарушенным зонам, в качестве основного базового способа улучшения свойств грунтов был принят двухстадийный способ инъекционного их упрочнения, заключающийся в том, что на первой стадии упрочнения грунтов выполняют инъекции растворов на основе цемента, а на второй стадии — растворов на основе силикатов и смол.

Отличительной особенностью геологического строения зон тектонических разломов является наличие в них одновременно скальных, полускальных трещиноватых грунтов, раздробленных тектоническими напряжениями до дресвяного состояния скалы, песка всех фракций, а также перетертых до тектонической муки включений и глины. Все составляющие грунтового массива в зонах тектонических нарушений хаотично расположены, обводнены и находятся под влиянием высоких значений горного давления и высоких (до 5 МПа) напоров подземных вод.

В таких сложных условиях упрощенное представление механизма инъекционного упрочнения грунтов приводило к серьезным ошибкам в расчетах и неудачам при производстве этих работ на многочисленных промышленных объектах, в том числе и на начальном этапе сооружения тоннелей БАМа.

Следует обратить внимание, что механизм инъекционного воздействия на грунты сложного геологического строения представляет собой комбинацию следующих процессов:

а) армирование грунта заполняющим инъекционные скважины цементным раствором;

б) пропитка части упрочняемого грунтового массива со сравнительно высокой проницаемостью инъекционными растворами;

в) консолидационное уплотнение менее проницаемой части грунтового массива путем образования в нем трещин гидроразрыва, заполнения их инъекционными растворами и обжатия высокими давлениями дезинтегрированного малопроницаемого грунта;

г) диффузионный массоперенос укрепляющего раствора в грунте под действием градиента концентраций, имеющий место на всех этапах инъекционного воздействия на уплотняемый грунт.

Теоретические аспекты инъекционного упрочнения грунтов при консолидированном уплотнении

Основную неприятность при проходке представляют водонасыщенные грунты, которые при вскрытии выработкой почти мгновенно приходят в неустойчивое состояние, сопровождаемое вывалами и выбросами обводненной массы. Вследствие ничтожно малой фильтрационной способности эти зоны практически невозможно пропитать инъекционным способом. Поэтому устойчивость таких грунтов повышают за счет их консолидационного уплотнения и создания армирующего грунт-каркаса из со временем затвердевающего инъекционного раствора. Конструкция создается гидроразрывами закрепляемого грунта раствором с внедрением его в толщу массива под большим давлением.

При выполнении работ по закреплению грунтовых массивов с использованием специальных методов выполнения работ на Северомуйском тоннеле технологические приемы были отработаны и не вызывали вопросов, в то время как расчетное обоснование их использования в качестве армогрунтовых конструкций

отсутствовало. Это, в свою очередь, не позволяло создать расчетный механизм определения технологических параметров инъекционных работ для получения армогрунтовой оболочки с заданной несущей способностью. Первым этапом исследований в этом направлении явился выбор модели грунта.

Так, при работе на Северомуйском тоннеле было установлено, что разрывы грунта происходят в основном в субвертикальном направлении.

В работе [2] авторами был применен приближенный способ расчета, разработанный для резинокордовых конструкций А. А. Лапиным [3], а для стеклопластиков — В. В. Болотиным [4].

Грунт, армированный твердеющим раствором (рис. 1, а), моделируется в виде пластинки, составленной из чередующихся слоев раствора и грунта (рис. 1, б). Объемное содержание раствора в пластине представляется коэффициентом ξ .

Рассмотрим плоское напряженное состояние такой модели (рис. 1, в). Здесь $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ — средние напряжения, то есть отношения соответствующих усилий к площади поперечного сечения.

Условия равновесия и совместности деформаций слоев грунта и раствора приводят к следующим уравнениям:

$$\sigma_1 = \xi \sigma_1' + (1 - \xi) \sigma_1''; \quad \sigma_2 = \sigma_2' = \sigma_2''; \quad \tau_{12} = \tau_{12}' = \tau_{12}''; \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1' = \varepsilon_1''; \quad \varepsilon_2 = \xi \varepsilon_2' + (1 - \xi) \varepsilon_2''; \quad \gamma_{12} = \xi \gamma_{12}' + (1 - \xi) \gamma_{12}'' \quad (2.2)$$

Величины с одним штрихом относятся к раствору, с двумя — к грунту; $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ — средние деформации модели.

Полагая, что каждый из материалов (грунт и раствор) является изотропным и подчиняется закону Гука, а связь между усредненными

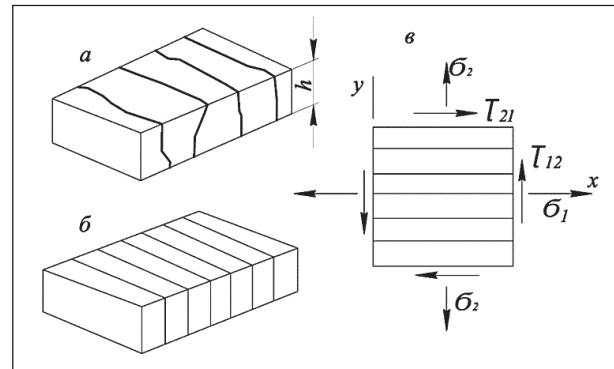


Рис. 1. Модель приближенного способа расчета конструкции А. Лапина и В. Болотина

напряжениями и деформациями имеет вид, характерный для ортотропного тела, получаем:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mathcal{G}_{12} \frac{\sigma_2}{E_2}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \mathcal{G}_{21} \frac{\sigma_1}{E_1}; \quad \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}, \quad (2.4)$$

$$\text{где } \left. \begin{aligned} E_1 &= \xi E' + (1 - \xi) E'' \\ E_2 &= \left[\frac{\xi(1 - \mathcal{G}^2)}{E'} + \frac{(1 - \xi)(1 - \mathcal{G}^2)}{E''} + \frac{\mathcal{G}_{21}^2}{E_1} \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Напряжения в прожилках раствора и грунте связаны со средними напряжениями формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1' &= \sigma_1 \frac{E'}{E_1} - \sigma_2 \frac{(1 - \xi)(E' \mathcal{G}'' - E'' \mathcal{G}')}{E_1} \\ \sigma_1'' &= \sigma_1 \frac{E''}{E_1} - \sigma_2 \frac{\xi(E' \mathcal{G}'' - E'' \mathcal{G}')}{E_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

С использованием выражения (2.5) и (2.6) нами был проведен анализ работы грунта, армированного твердеющим раствором, и определены пути возможной оптимизации инъекционного закрепления.

Увеличения несущей способности такой армогрунтовой конструкции можно достигнуть в основном по двум направлениям. Первое — это консолидационное уплотнение и упрочнение грунта, второе — увеличение процента армирования (коэффициента ξ) и повышение прочности арматуры (раствора).

Исследование изменения модуля деформации армогрунта вдоль арматуры E_1 показывает значительно больший эффект снижения деформативности конструкции и, соответственно, проявления горного давления от повышения модуля деформации грунта E'' , чем от увеличения модуля деформации армирующего раствора E' . Тангенс угла наклона графиков, характеризующий рост E_1 , не зависит от изменения E'' и равен 0,5 (рис. 2).

Отмечено, что при зависимости E_1 от E' тангенс угла наклона меняется от 0,088 при $\xi = 0,005$ до 0,35 при $\xi = 0,02$, то есть эффективность роста E_1 при увеличении E' меньше.

Модуль деформации армогрунта перпендикулярно расположению армирующего инъекционного элемента E_2 практически не зависит и от изменения модуля деформации армирующего инъекционного элемента E' и прямо пропорционально увеличивается с ростом модуля деформации грунта E'' .

Следовательно, причина снижения проявления горного давления — в увеличении модуля деформации грунта путем его консолидационного уплотнения.

Напряжения в армогрунте в сечениях, перпендикулярных армирующему инъекционному элементу, при плоском напряженном состоянии практически не зависят от модуля деформации грунта E'' , раствора E' и коэффициента армирования ξ , принимаемого в пределах, наблюдаемых на практике при ведении инъекционных работ на Северомуйском тоннеле.

На напряженно-деформированное состояние в растворе в значительной степени влияют модуль деформации грунта E'' и степень армирования ξ (рис. 3). Чем ниже E'' , тем больше напряжения.

На рис. 3 видно, что чем ниже степень армирования, тем больше напряжение в растворе. Так как степень армирования ограничива-

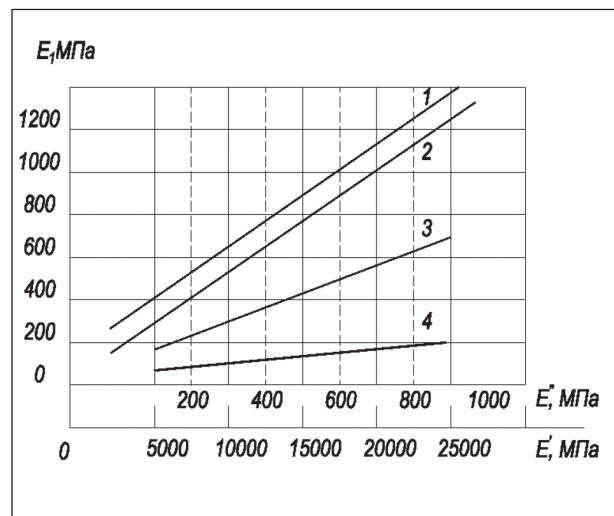


Рис. 2. График зависимости E от E'' и E' , где 1 и 2 — E'' — модуль деформации грунта; 3 и 4 — E' — модуль деформации армирующего раствора

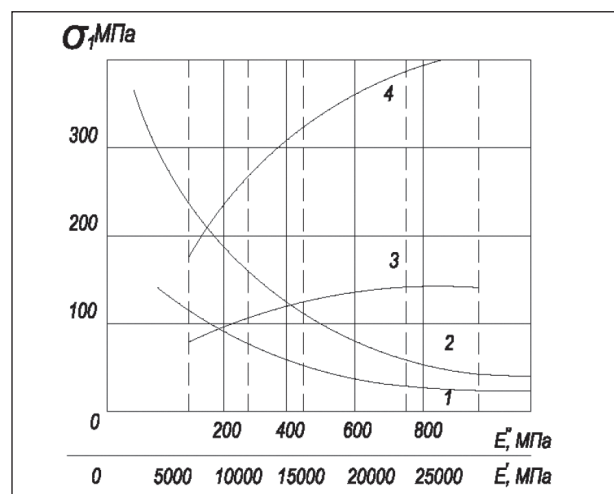


Рис. 3. Зависимость напряжения раствора σ от степени армирования, где 1 и 2 — E'' — модуль деформации грунта; 3 и 4 — E' — модуль деформации армирующего раствора

ется величиной возможного обжатия грунта при инъекции, то степень влияния армирования твердеющим раствором грунта носит ограниченный характер. С одной стороны, требуется создать арматурный каркас в виде

армирующих инъекционных элементов с высокими прочностными характеристиками, а с другой — с высокой податливостью.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать выводы:

- увеличение деформативных и прочностных характеристик армогрунта обеспечивается консолидационным уплотнением грунтов;
- изменение прочностных характеристик армирующего раствора оказывает незначительное влияние на прочностные показатели армогрунта в целом;
- предложенная методика инженерного расчета позволяет количественно оценить работу грунта, армированного инъекционным раствором, с получением обобщенных (усредненных) прочностных и деформативных характеристик, которые могут быть использованы в расчетах создаваемых армогрунтовых конструкций [5, 6].

Список источников

1. Cambefort N. Injection des sols. Vol. 1. Principes et methods. Eyrolles, Paris, 1964.

2. Безродный К. П., Мацегора А. Г. Инъекционное укрепление грунтов // Метрострой. 1986. №7.

3. Лапин А. А. Плоская деформация резинокордовой ткани // Расчеты на прочность в машиностроении: сб. / МВТУ. М.: Машгиз, 1955.

4. Болотин В. В. Плоская задача теории упругости для деталей и армированных материалов // Расчеты на прочность: сб. Вып. 12. М.: Машиностроение, 1966.

5. Проектирование и технология инъекционного закрепления грунтов при строительстве транспортных тоннелей / А. Г. Мацегора [и др.]. М.: Ленметрогипротранс, 1997.

6. Фотиева Н. Н., Безродный К. П., Саммаль А. С. Расчет инъекционного упрочнения грунтов зон тектонических разломов // Методы искусственной стабилизации грунтов при строительстве Северомуйского тоннеля: сб. научных трудов. М.: ЦНИИС, 1990.

Дата обращения: 03.10.2025

Решение о публикации: 13.02.2026

Контактная информация:

ФИЛИППОВ Сергей Леонидович – инженер;
transport-stroy@mail.ru

Improvement of soil properties in tunnel construction, as demonstrated by the Severomuya Tunnel construction

S. L. Filippov

LLC. POLYEKO, app. 8, 3 Lineinaya str., Vladimir, 600020, Russia

For citation: *Filippov S. L.* Improvement of soil properties in tunnel construction, as demonstrated by the Severomuya Tunnel construction // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 221–228. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-221-228. (In Russian)

Abstract

Objective: to research the mechanisms of injection strengthening of soils in fault zones by investigating the physical and chemical processes that take place under conditions of severe soil disintegration, high moisture content, and elevated hydrostatic pressures. **Methods:** theoretical models for injection strengthening of

unstable, highly fragmented soils, including gravel, sand and clay, were examined, covering filtration mode injection and injection by consolidated compaction (the hydro-fracturing method). **Results:** ground consolidation yields predictable behavior of the treated soil mass along the tunnel alignment, and improves soil properties that can be incorporated into subsequent design calculations for reinforced soil structures. The mechanism of injection strengthening is interpreted as a complex interaction between the time-dependent hardening of injected solutions and their migration under the influence of hydrostatic pressure and filtration flow, following the sequence: injection well => natural cracks and large pores => artificial cracks and channels => small pores. **Practical importance:** the techniques described in this paper represent major developments and have been extensively employed as effective methods for artificially stabilizing disintegrated, unstable soils by treating them with injection solutions to enhance their properties. Injection strengthening methods, in various forms, have been applied to more than 150 faults of varying depths and lengths within the BAM tunnels.

Keywords: injection, filtration, strengthening/stabilization, soils, deformations

References

1. Cambefort N. Injection des sols. Vol. 1. Principes et shethods. Eyrolles, Paris, 1964.
2. Bezrodnij K.P., Matsegora A.G. In"ektsionnoe ukreplenie gruntov // Metrostroj. 1986. No. 7. (In Russian)
3. Lapin A.A. Ploskaya deformatsiya rezinokordovoj tkani // Raschety na prochnost' v mashinostroenii: sb. / MVTU. M.: Mashgiz, 1955. (In Russian)
4. Bolotin V. V. Ploskaya zadacha teorii uprugosti dlya detalej i armirovannykh materialov // Raschety na prochnost': sb. Vyp. 12. M.: Mashinostroenie, 1966. (In Russian)
5. Proektirovanie i tekhnologiya in"ektsionnogo zakrepleniya gruntov pri stroitel'stve transportnykh tonnelej/A. G. Matsegora [i dr.]. M.: Lenmetrogiprotrans, 1997. (In Russian)
6. Fotieva N.N., Bezrodnij K.P., Sammal' A.S. Raschet in"ektsionnogo uprochneniya gruntov zon tektonicheskikh razlomov // Metody iskusstvennoj stabilizatsii gruntov pri stroitel'stve Severomujskogo tonnelya: sb. nauchnykh trudov. M.: TsNIIS, 1990. (In Russian)

Received: 03.10.2025

Accepted: 13.02.2026

Author's information:

Sergey L. FILIPPOV — engineer;
transport-stroy@mail.ru



УДК 007.51

Концептуализация развития инфокоммуникационных систем для водного транспорта с внешним экипажем в Арктике

К. С. Простакевич¹, И. А. Сикарев¹, И. В. Юрин¹, Ю. В. Козлов¹, В. М. Абрамов²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79

²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Для цитирования: Простакевич К. С., Сикарев И. А., Юрин И. В., Козлов Ю. В., Абрамов В. М. Концептуализация развития инфокоммуникационных систем для водного транспорта с внешним экипажем в Арктике // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 229–238. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-229-238

Аннотация

Цель: разработать направления концептуализации развития инфокоммуникационных систем для водного транспорта с внешним экипажем в Арктике с учетом необходимости обеспечения информационной безопасности создаваемых на современном этапе проектов. **Методы:** применены методы аналогий и абстрагирования, форсайт-технологии, а также технологии сканирования открытых источников (OSINT-технологии). **Результаты:** разработаны направления концептуализации перспективного развития инфокоммуникационных систем для водного транспорта с внешним экипажем в Арктике с использованием систем обеспечения ретрансляции сигналов связи между судами с внешним экипажем и удаленными центрами дистанционного управления в условиях информационных угроз с учетом требований информационной безопасности. **Практическая значимость:** рекомендации по использованию различных схем ретрансляции сигналов связи.

Ключевые слова: инфокоммуникационные системы, суда с внешним экипажем, морская радиосвязь, информационная безопасность, Арктика

Введение

На современном этапе деятельность водного транспорта (ДВТ) в глобальном и национальном аспектах проходит стадию расширенной автоматизации — вплоть до разработки и пробного применения автономных и полуавтономных коммерческих судов (АПАКС), в том числе и в Арктике, где применение АПАКС может сталкиваться с дополнительными трудностями в области безопасной эксплуатации. При этом концептуальный уровень собственно проблематики АПАКС можно охарактеризовать как фрагментарный и нуждающийся в значительном развитии, в первую очередь в области инфокоммуникационных

систем (ИКС) с учетом требований информационной безопасности (ИБ). В этой связи следует отметить некоторый прогресс, обусловленный системными исследованиями [1, 2], в том числе в области инфокоммуникации [3–7], с учетом необходимости управления природными рисками (УПР) [8–13]. Следует отметить, что важным этапом автоматизации ДВТ в обязательном порядке будет являться эксплуатация АПАКС под управлением внешнего экипажа (ВЭ), который будет подразумевать наличие удаленного центра дистанционного управления (УЦДУ) конкретными АПАКС. В настоящее время этому аспекту развития автоматизации ДВТ уделено недостаточно

внимания. Целью исследований в рамках настоящей статьи является концептуализация развития инфокоммуникационных систем для водного транспорта с внешним экипажем в Арктике.

Методы и материалы

При выполнении исследований применены методы аналогий и абстрагирования, форсайт-технологии, технологии сканирования открытых источников (OSINT-технологии) научно-методических публикаций в глобальном пространстве.

Результаты исследования

Выполненный в ходе исследований системный анализ с помощью OSINT-технологий показал, что российская программа «Национальная технологическая инициатива», имеющая в качестве горизонта планирования 2035 год, может рассматриваться как концептуальный приоритет в создании и применении технологий для использования АПАКС. На начальном этапе реализации данной программы можно выделить следующие достигнутые результаты:

- представлен катер с внешним экипажем «Герои Тумана» (рис. 1), разработанный ООО «НПК Прогресс» для доставки грузов в Мурман-

ской области и эксплуатации на Северном морском пути (СМП). Катер изначально рассчитывался под суровые условия Арктического бассейна;

- открыт единый центр по производству морских дронов для гражданских целей;
- на Сахалине в июне 2025 года открыт полигон для испытаний автономных и полуавтономных катеров;
- российские вузы в 2023 году выпустили первую группу из 43 моряков для эксплуатации автономных паромов;
- в 2024–2025 годах переподготовку по программам морских автономных надводных судов (МАНС) прошли 1952 курсанта.

Следует отметить, что важнейшей концептуальной составляющей применения АПАКС с ВЭ в Арктике является разработка и внедрение адекватных систем обеспечения ретрансляции сигналов связи (СОРСС) между АПАКС и УЦДУ, поскольку обычно на арктическом направлении при реализации типичной ДВТ дистанции между АПАКС и УЦДУ требуются применения СОРСС. Отметим, что в настоящее время вопросам разработки и внедрения СОРСС между АПАКС и УЦДУ в Арктике уделяется явно недостаточно внимания, в том числе и с учетом необходимого обеспечения информационной безопасности (ИБ).



Рис. 1. Катер с внешним экипажем «Герои Тумана». Фото: нпкпрогресс.рф

Необходимо учитывать, что природные условия Арктики сильно усложняют задачу обеспечения надежной связи, в том числе и при использовании СОРСС. На сегодняшний день в районах плавания, где отсутствует связь на УКВ, используются коротковолновые радиостанции и коротковолновые модемы (например, Codan 3012 или SCS P4dragon DR-7400), которые обеспечивают работу совместно с КВ трансиверами ведущих мировых производителей и предназначены для полностью автоматизированной передачи данных со скоростью от 6000 до 9000 бит/с. Учитывая требования к скорости передачи данных в автоматических идентификационных системах (9600 бит/с для передачи динамических данных и 1200 бит/с для передачи статических данных), очевидно, что коротковолновая аппаратура не способна полностью удовлетворить потребности АИС. Такие явления, как фединг на коротких волнах, приводят к периодическим разрывам канала связи, что может способствовать возникновению аварийной ситуации при дистанционном управлении.

В некоторых случаях возможным является использование низкоскоростных модемов в средневолновом диапазоне, например, для передачи коротких текстовых сообщений, команд, координат. При ортогональной частотной манипуляции вероятность битовой ошибки незначительна. В арктических районах плавания количество промышленных помех крайне мало, что позволяет поддерживать сеансы связи на значительные расстояния, особенно в ночное время. Однако в низкоскоростных системах передачи невозможно использование помехоустойчивых кодов с большим размером блока, и, как следствие, обеспечить безопасность данных на требуемом уровне не представляется возможным.

При необходимости передачи больших объемов данных приходится использовать диапа-

зон высоких частот (метровые, сантиметровые волны). Дальность действия аппаратуры в диапазонах 137–174 МГц и 400–512 МГц составляет 70 и 50 км соответственно. Скорость передачи данных при этом достигает 128 Кбит/с, что вполне достаточно для обеспечения приема телеметрии и управления судном. При работе на более высоких частотах (от 2 ГГц и выше) необходима прямая видимость антенн, соответственно, не обойтись без ретранслятора, при этом обеспечиваются скорости передачи данных от 2 Мбит/с и выше, что в полной мере покрывает потребности автоматизированных систем управления.

В качестве ретрансляторов могут быть использованы:

- космические аппараты (КА) на различных орбитах;
- высотные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с большой продолжительностью полета (псевдо КА);
- дирижабли и аэростаты;
- самолеты и вертолеты.

Для наличия зон радиовидимости (ЗРВ) КА в Арктике необходимо, чтобы наклонение орбиты спутника находилось в диапазоне от 60 до 120°. Этому условию в полной мере отвечают немногие орбитальные группировки систем спутниковой связи, тем более — обеспечивающие отсутствие разрывов в зоне обслуживания. Прежде всего это система Iridium на низкоорбитальных спутниках, обеспечивающая беспроводную телефонную сеть мобильной персональной связи, зона действия которой включает Арктику, но принадлежность сети военному ведомству США делает невозможной ее работу в интересах России.

Технически почти безупречен Starlink, имеющий на околополярных орбитах уже более 200 КА (рис. 2).

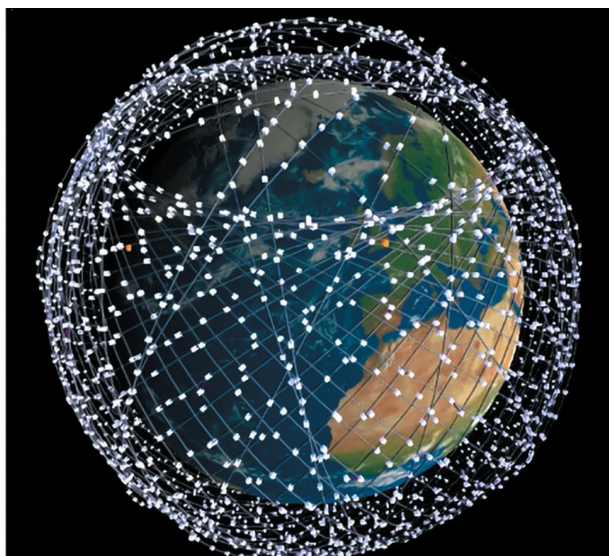


Рис. 2. Общий вид размещения на орбитах космических аппаратов Starlink.
Фото: <https://www.cableman.ru>

Отметим, что компания SpaceX занимает крупнейшую долю рынка спутниковой связи — 75%, имеет огромные ресурсы и множество возможностей, однако Starlink в России официально не работает, а международная обстановка и прогнозы ее развития не позволяют уверенно полагаться на зарубежные предложения в любой чувствительной, а уж тем более критической области развития страны. Неспроста катер «Герои Тумана» хоть и оснащен аппаратурой Starlink, но в перспективе имеет возможность подключения других спутниковых систем.

Отечественные возможности спутниковой связи для функционала СОРСС в настоящее время скромнее, чем в системе Starlink, однако можно рассматривать несколько отечественных проектов. В первую очередь это действующая система КА «Гонец», которая может позволить реализовывать связь между АПАКС и УЦДУ в Арктике. В системе «Гонец» функционируют 12 КА, которые занимают почти круговые орбиты с наклоном 82,5. Высота орбиты каж-

дого КА составляет около 1400 км, при этом полное время обращения КА составляет около 114 мин. Зона покрытия на земной поверхности для одного КА системы «Гонец» в диаметре имеет около 5000 км. Рабочий диапазон частот занимает полосу 300/400 МГц. Основным недостатком системы КА «Гонец» является незначительное по современным требованиям количество КА, в результате чего связь между АПАКС и УЦДУ в Арктике может носить прерывистый характер.

Следует отметить, что перспективной для функционала СОРСС является разворачиваемая система КА «Арктика-М», которая служит независимым источником критически важных данных для освоения Арктики, обеспечивая двустороннюю связь в труднодоступных регионах и осуществляя сбор и ретрансляцию данных с автоматических наземных и морских платформ в сантиметровом и дециметровом диапазонах (рис. 3).

Следует отметить, что расстояние до КА «Арктика-М» требует достаточно мощного передатчика и/или антенны с очень узкой диаграммой направленности, также присутствует значительное время задержки. Кроме того, до полного развертывания системы КА «Арктика-М» возможны перерывы в обслуживании.

Наиболее перспективной для СОРСС выглядит система «Рассвет», экспериментальные КА которой, запущенные в 2023–2024 годах, полностью завершили испытания, подтвердив возможность передачи широкополосным сигналом полезной информации. В переходный период (до окончания развертывания) возможны различные варианты систем спутниковой связи, в том числе с дублированием отечественных решений иностранными.

Более бюджетной и гибкой основой для ретрансляторов систем связи могут быть высотные БПЛА самолетного типа с большой

продолжительностью и высотой полета, для которых иногда используется термин «псевдокосмический аппарат» (ПКА). Такой ПКА с большой площадью солнечных панелей для длительного пребывания в воздухе может долго оставаться в стратосфере, выполняя функции, аналогичные функциям спутников (наблюдение, связь). Лучшим на данный момент ПКА можно назвать Airbus Zephyr S (рис. 4). За ним числятся несколько рекордов. Например, он два года назад продержался над пустыней Сонора в США 42 дня на высоте около

21 километра. Аппарат весит 75 кг, при этом берет на борт 25 кг. Полезную нагрузку вполне может составлять ретранслятор.

Отечественный аналог ПКА представлен двумя экспериментальными стратосферными БПЛА «Аист» от НПО Лавочкина. Прототипы именуются ЛА-251 и ЛА-252 и используют жесткое плоское крыло. Прототип ЛА-251 представлен на рис. 5. Взлетная масса аппаратов порядка 120 кг с полезной нагрузкой около 25 кг. Расчетный потолок составляет около 18 км.

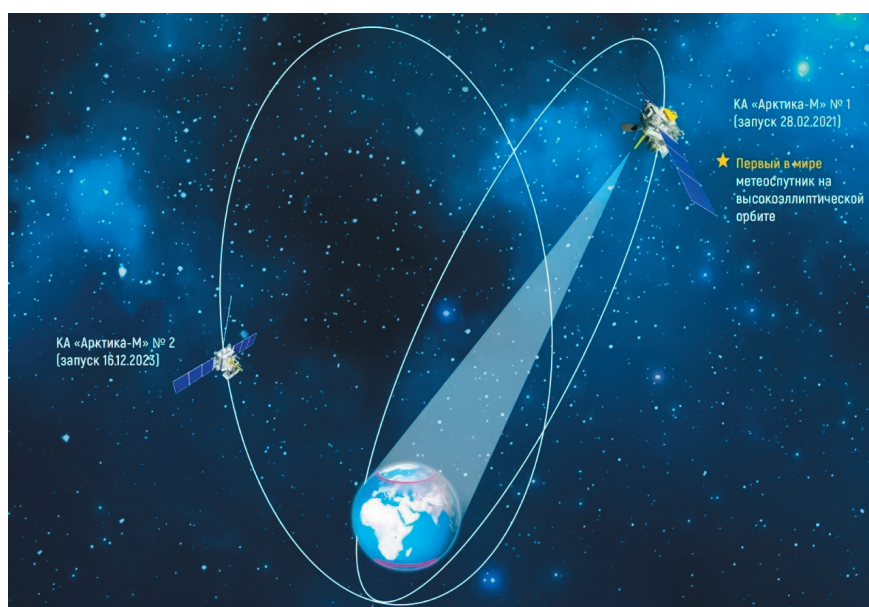


Рис. 3. Орбитальная схема КА «Арктика-М». Фото: «Роскосмос»

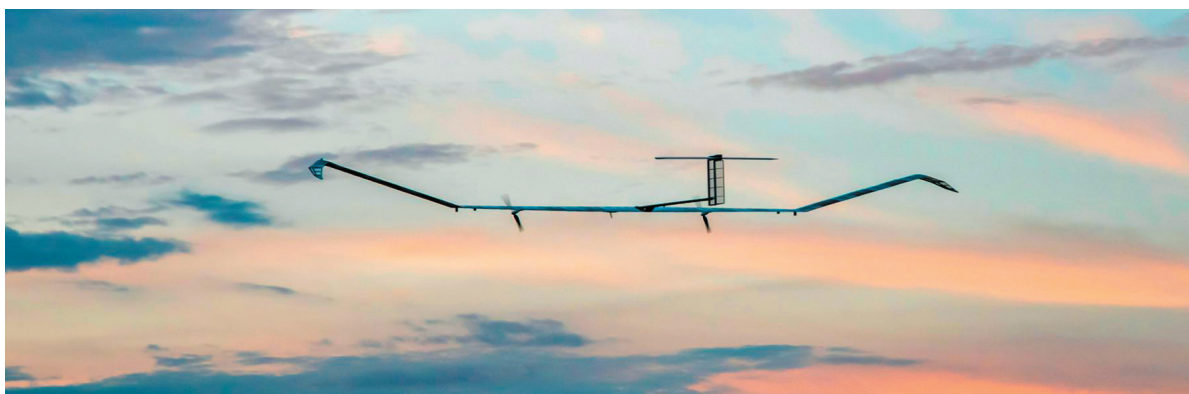


Рис. 4. Стратосферный БПЛА Airbus Zephyr S. Фото: AALTO HAPS LTD



Рис. 5. Стратосферный БПЛА «Аист» (ЛА-251). Фото: «Роскосмос»

Отметим, что международная классификация UVS International делит подобные БПЛА на экзостратосферные, стратосферные и высотные с большой продолжительностью полета. В то же время российская классификация БПЛА содержит единственный класс «тяжелые БПЛА большой продолжительности полета». Кстати, эта же российская классификация БПЛА определяет дирижабли как «БПЛА аэростатического типа», которые вместе с привязными аэростатами также могут обеспечивать функционал СОРСС между АПАКС и УЦДУ.

В настоящее время в России имеются серийно выпускаемые аэростаты, которые можно запускать с автомобиля. При определенных обстоятельствах и небольшой модернизации такие аэростаты можно будет доставлять вертолетами в заданную точку и закреплять к земле, обеспечив их источником энергии. Полезная нагрузка привязного аэростата «Барс» составляет 120 кг, рабочая высота — 1200 м. Он имеет прочный кабель-трос для питания аппаратуры и высокую ветровую устойчивость, что позволяет выполнять задачу СОРСС между АПАКС и УЦДУ при любой погоде.

Отметим, что британская фирма StarSat занималась разработкой дирижаблей, которые, по замыслу создателей, должны занимать стационарную позицию на границе стратосферы (высота около 20 км) и работать без обслуживания 5 лет. При достаточном финансировании проект может оказаться перспективным, так как количество необходимых для формирования сети связи дирижаблей намного меньше количества привязных аэростатов.

Важным концептуальным аспектом разработки и внедрения в эксплуатацию СОРСС между АПАКС и УЦДУ является ИБ. К числу особо опасных информационных угроз следует отнести перехват управления судном. Следует отметить, что спутниковые системы связи также содержат большое количество уязвимостей, включая блокировку критически важных команд и перехват данных.

Заключение

Основным результатом выполненных исследований является концептуализация перспективного развития ИКС для ДВТ с ВЭ в Арктике с использованием СОРСС между АПАКС и УЦДУ в условиях ИУ с учетом требований ИБ. Следует отметить, что до настоящего времени отсутствует нормативно-правовая база по вопросам разработки и проектирования ИКС для ДВТ с ВЭ в Арктике с использованием СОРСС между АПАКС и УЦДУ в условиях ИУ с учетом требований ИБ. Основная практическая значимость состоит в рекомендации использования различных схем СОРСС между АПАКС и УЦДУ, включая применение ПКА и стратосферных дирижаблей. Результаты исследований обладают значительной научной новизной и могут быть использованы различными потребителями в области автоматизации ДВТ в Арктике, в том числе и в образовательных целях [14, 15].

Список источников

1. Канаев А. К., Логин Э. В., Гришанов И. С. Комплексный алгоритм процессов контроля и управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet с применением механизмов ОАМ // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, вып. 2. С. 266–275.
2. Канаев А. К., Логин Э. В., Пудовкина К. А. Декомпозиция процессов управления данными в СМДБ // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, вып. 1. С. 151–160.
3. Сикарев И. А. Сложные сигналы в адаптивных функционально устойчивых автоматизированных идентификационных системах на речном транспорте / Федеральное агентство морского и речного трансп., Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Санкт-Петербургский гос. ун-т водных коммуникаций». СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 84 с.
4. Цифровизация защиты информации в телекоммуникационных подсистемах полуавтономных надводных судов с внешним экипажем / И. А. Сикарев [и др.] // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. 2024. № 33. С. 88–89.
5. Инфокоммуникационный инструментарий для управления природными рисками при мореплавании автономных судов в Арктике при изменении климата / И. А. Сикарев [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2024. № 1 (58). С. 110–120.
6. Цифровизация инфокоммуникационных систем для обеспечения безопасности при коммерческом использовании автономных судов в ледовых условиях / И. А. Сикарев [и др.] // Электросвязь. 2024. № 2. С. 51–54.
7. Decision aid expert system for Russian Arctic sustainable development under climate change / V. M. Abramov [et al.] // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk, 25–28 April 2023. Vol. 389. Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. P. 02025.
8. Innovative Digital Technologies Development for Projects Management within Northern Sea Route Area / V. M. Abramov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage. Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA 2019), Madrid, 13–14 November 2019. Madrid: International Business Information Management Association, 2019. Pp. 10132–10141.
9. Digital Technologies for Sea Ports Geo-Information Support while climate change and Covid-19 / V. M. Abramov [et al.] // 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA) Proceedings of the 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Granada, Spain, 04–05 November 2020. Granada, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2020. Pp. 8144–8152.
10. Geo-information Tools Develop for Integrated Coastal Zone Management in Arctic and Subarctic / V. M. Abramov [et al.] // Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Madrid, Spain, 13–14 November 2019. Madrid, Spain: International Business Information Management Association, 2019. Pp. 10763–10771.
11. Innovative technologies for geo-ecological support while artificial coastal territories development / M. Shilin [et al.] // 19th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019: Conference proceedings, Albena, 30 June — 06 July 2019. Vol. 19. Sophia, 2019. Pp. 399–406.
12. Clusters within geospatial information management for development of the territory / E. P. Istomin [et al.] // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria,

30 June — 06 July 2016. Vol. 1. Albena, Bulgaria, 2016. Pp. 601–608.

13. Abramov V. M., Popov N., Bachiev R. I. Decadal variability of particulate matter in Moscow megacity air // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June — 06 July 2016. Vol. 2. Albena, Bulgaria, 2016. Pp. 323–330.

14. Digital Technologies Formation for University Education under Covid-19 / V. M. Abramov [et al.] // Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference Innovation Management and information Technology impact on Global Economy in the Era of Pandemic, Cordoba, 30–31 May 2021. Cordoba: IBIMA Publishing, 2021. Pp. 5161–5169.

15. Digital learning technologies within geo-information management / S. Lukyanov [et al.] // E3S

Web of Conferences, Chelyabinsk, 17–19 February 2021. Chelyabinsk, 2021. P. 01004.

Дата поступления: 05.12.2025

Решение о публикации: 02.02.2026

Контактная информация:

ПРОСТАКЕВИЧ Константин Сергеевич — аспирант; atombyfreund@mail.ru

СИКАРЕВ Игорь Александрович — д-р техн. наук, профессор; sikarev@yandex.ru

ЮРИН Игорь Валентинович — канд. техн. наук, доцент; 9402015@mail.ru

КОЗЛОВ Юрий Викторович — канд. техн. наук, доцент; y.kozlov@rshu.ru

АБРАМОВ Валерий Михайлович —

канд. физ.-мат. наук, доцент;

val.abramov@mail.ru

Conceptualization of information and communication system development for remotely operated maritime transport in Arctic region

K.S. Prostakevich¹, I.A. Sikarev¹, I.V. Yurin¹, Yu. V. Kozlov¹, V.M. Abramov²

¹Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., Saint Petersburg, 192007, Russia

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya st., Saint Petersburg, 198035, Russia

For citation: *Prostakevich K.S., Sikarev I.A., Yurin I.V., Kozlov Yu.V., Abramov V.M.* Conceptualization of information and communication system development for remotely operated maritime transport in Arctic region // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 229–238. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-229-238. (In Russian)

Abstract

Objective: to develop strategic directions for conceptualizing information and communication systems for remotely operated Arctic maritime transport, with particular emphasis on ensuring information security within contemporary project designs. **Methods:** analogy and abstraction methods, foresight-technologies, and open-source scanning techniques (OSINT) were applied. **Results:** prospective directions for information and communication system development tailored to remotely operated Arctic maritime transport have been outlined. The proposals advocate deploying communication signal-relay architectures

that sustain connectivity between vessels with external crews and remote control centers under conditions of information threat, while concurrently satisfying information security requirements. **Practical significance:** the research offers recommendations on applying diverse signal-relay communication architectures.

Keywords: information and communication systems, vessels with an external crew, maritime radio communication, information security, Arctic

References

1. Kanaev A.K., Login E.V., Grishanov I.S. Kompleksnyj algoritm protsessov kontrolya i upravleniya telekommunikatsionnoj set'yu Carrier Ethernet s primeneniem mekhanizmov OAM // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2022. T. 19, vyp. 2. S. 266–275. (In Russian)
2. Kanaev A.K., Login E.V., Pudovkina K.A. Dekompozitsiya protsessov upravleniya dannymi v CMDDB // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023. T. 20, vyp. 1. S. 151–160. (In Russian)
3. Sikarev I. A. Slozhnye signaly v adaptivnykh funktsional'no ustojchivyykh avtomatizirovannykh identifikatsionnykh sistemakh na rechnom transporte / Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transp., Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij gos. un-t vodnykh kommunikatsij". SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta, 2010. 84 s. (In Russian)
4. Tsifrovizatsiya zashchity informatsii v telekommunikatsionnykh podsystemakh poluavtonomnykh nadvodnykh sudov s vneshnim ekipazhem / I.A. Sikarev [i dr.] // *Metody i tekhnicheskie sredstva obespecheniya bezopasnosti informatsii*. 2024. No. 33. S. 88–89. (In Russian)
5. Infokommunikatsionnyj instrumentarij dlya upravleniya prirodnyimi riskami pri moreplavanii avtonomnykh sudov v Arktike pri izmenenii klimata / I.A. Sikarev [i dr.] // *Problemy informatsionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy*. 2024. No. 1 (58). S. 110–120. (In Russian)
6. Tsifrovizatsiya infokommunikatsionnykh sistem dlya obespecheniya bezopasnosti pri kommercheskom ispol'zovanii avtonomnykh sudov v ledovykh usloviyakh / I. A. Sikarev [i dr.] // *Elektrosvyaz'*. 2024. No. 2. S. 51–54. (In Russian)
7. Decision aid expert system for Russian Arctic sustainable development under climate change / V.M. Abramov [et al.] // *E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region" (UESF-2023)*, Chelyabinsk, 25–28 April 2023. Vol. 389. Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. P. 02025.
8. Innovative Digital Technologies Development for Projects Management within Northern Sea Route Area / V. M. Abramov [et al.] // *Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage. Proceedings of the 34rd International Business Information Management Association Conference (IBIMA 2019)*, Madrid, 13–14 November 2019. Madrid: International Business Information Management Association, 2019. Pp. 10132–10141.
9. Digital Technologies for Sea Ports Geo-Information Support while climate change and Covid-19 / V.M. Abramov [et al.] // *36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA) Proceedings of the 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA)*, Granada, Spain, 04–05 November 2020. Granada, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2020. Pp. 8144–8152.
10. Geo-information Tools Develop for Integrated Coastal Zone Management in Arctic and Subarctic / V. M. Abramov [et al.] // *Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA)*, Madrid, Spain, 13–14 November 2019. Madrid, Spain: International

Business Information Management Association, 2019. Pp. 10763–10771.

11. Innovative technologies for geo-ecological support while artificial coastal territories development / M. Shilin [et al.] // 19th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019: Conference proceedings, Albena, 30 June — 06 July 2019. Vol. 19. Sophia, 2019. Pp. 399–406.

12. Clusters within geospatial information management for development of the territory / E.P. Istomin [et al.] // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June — 06 July 2016. Vol. 1. Albena, Bulgaria, 2016. Pp. 601–608.

13. Abramov V. M., Popov N., Bachiev R. I. Decadal variability of particulate matter in Moscow megacity air // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June — 06 July 2016. Vol. 2. Albena, Bulgaria, 2016. Pp. 323–330.

14. Digital Technologies Formation for University Education under Covid-19 / V.M. Abramov [et al.] // Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference Innovation

Management and information Technology impact on Global Economy in the Era of Pandemic, Cordoba, 30–31 May 2021. Cordoba: IBIMA Publishing, 2021. Pp. 5161–5169.

15. Digital learning technologies within geo-information management / S. Lukyanov [et al.] // E3S Web of Conferences, Chelyabinsk, 17–19 February 2021. Chelyabinsk, 2021. P. 01004.

Received: 05.12.2025

Accepted: 02.02.2026

Author's information:

Konstantin S. PROSTAKEVICH — Postgraduate Student; atombyfreund@mail.ru

Igor A. SIKAREV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; sikarev@yandex.ru

Igor V. YURIN — PhD in Engineering, Associate Professor; 9402015@mail.ru

Yuri V. KOZLOV — PhD in Engineering, Associate Professor; y.kozlov@rshu.ru

Valery M. ABRAMOV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor;

val.abramov@mail.ru