

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

Петербургского университета
путей сообщения

Издается с 1884 г.



Том 23
ВЫПУСК 2
2026

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 23, выпуск 2, 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
ООО «УРАЛ-ПРЕСС ОКРУГ». Индекс подписки: 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

Курилкин Дмитрий Николаевич, заместитель
главного редактора, 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 технологий, Тегеран, Иран

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рахимов Рустам Вячеславович, д-р техн. наук,
профессор, Ташкентский государственный 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 18.06.2026. **Выход в свет:** 30.06.2026
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 34.18.
Тираж 200 экз. Заказ 2084/2. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «Типографский комплекс «Девиз»,
190020, Санкт-Петербург, вн. тер. г. МО Екатеринбургский, 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 2, 2026

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

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University

Publisher

Media Service LLC under contract № ЭА87426, 12.01.2026

Founder's address

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

Publisher's and editorial address

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

Mass media registration certificate number

ПИ N ФС2-7499 dd. 06.04.2005

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

The journal is registered

in the Russian Science Citation Index (RSCI)

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed by the Agency "URAL-PRESS
OKRUG LLC". Index Direct Mail: 33315

JOURNAL STAFF

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- А. С. Ададунов, И. М. Подгребенный, А. Н. Иванов, П. И. Цомаев**
 Результаты моделирования воздействия колеса грузового вагона с двумя ползунами небраковочного размера на железнодорожный путь..... 245
- А. А. Мирошник, А. И. Даниленко**
 Применение специального устройства для транспортировки звеньев при восстановлении железнодорожного пути255
- А. В. Шевченко**
 Разработка архитектуры единой цифровой платформы интеграции телематических данных автономных рефрижераторных вагонов с корпоративными системами ОАО «РЖД» на основе технологий промышленного интернета вещей и блокчейна 264
- А. В. Карманов**
 Расчет паразитных емкостей асинхронного тягового электродвигателя, управляемого преобразователем частоты..... 277
- А. Д. Соловьёв**
 Методы защиты объектов железнодорожной автоматики и телемеханики от ударов молнии..... 288
- Ф. В. Чеснович**
 Сравнительный анализ технологий воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования для диагностики железнодорожного пути: критерии выбора на основе оценки точности, производительности и эксплуатационных ограничений..... 299
- Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси, И. А. Яицков**
 Теоретическое описание процессов и связей в поглощающих аппаратах тяговых агрегатов 309
- И. С. Пономарев, М. Ю. Обухов, Д. А. Елин, А. М. Евстафьев**
 Диагностика узлов тяговых электрических двигателей скоростных поездов типа Push-Pull на сети железных дорог России315
- В. Ф. Танаев, А. М. Рогов**
 Повышение управляемости системы пневматического торможения грузового поезда ... 326
- К. М. Тимухин, М. М. Аманов**
 Выбор станции дислокации для отставленных от движения поездов в пути следования как инструмент повышения эффективности работы транспортной системы.....341
- С. Н. Коржов, П. А. Поляков, И. А. Яицков**
 Способ уменьшения тормозного пути вагона электропоезда путем усовершенствования конструкции клещевого механизма тормозного устройства 349
- М. А. Шрайбер**
 Экспериментальные исследования термомеханических напряжений в асинхронных электродвигателях локомотивов..... 360
- Д. В. Язев, В. В. Костенко, А. Н. Иванков**
 Моделирование движения поездов на основании анализа статистических данных....370
- Е. А. Кайкина, А. В. Новичихин**
 Разработка методики переработки контейнеропотоков на основе языка транспортно-логистических объектов..... 381

**ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

- В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, Ю. Г. Янко**
Влияние формы поперечного сечения бесполостной дрены на эффективность осушения391
- В. Н. Кавказский, Е. А. Ермонин**
Сравнительный анализ методов оценки начальных смещений призабойной области в условиях малопрочных полускальных грунтов 402
- Д. В. Веремеев, П. А. Пегин**
Выбор оптимального значения цилиндрических элементов башенных сооружений.....417
- Я. В. Мельник, А. Э. Федоров**
Оценка возможности применения нового способа сооружения подводных городских тоннелей в несвязных илистых грунтах..... 427
- В. А. Надежкин, И. С. Бредун**
Экспериментальные исследования зависимости тока, протекающего через изолирующий стык, от изменения его сопротивления..... 436
- А. Н. Макаров, П. А. Кравченко**
Проблемы аварийности при всплытии паркинга и методы стабилизации путем применения анкерной (многовинтовой) сваи на примере одного из объектов в Санкт-Петербурге 443
- А. А. Шульгин**
Устойчивость каркаса при прогрессирующем обрушении и воздействии переменной температуры..... 456
- А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков**
Изменение напряженно-деформированного состояния тоннельной камеры после капитального ремонта вентиляционной шахты..... 462
- С. С. Салиханов, Э. С. Карпетов**
Анализ современной нормативной базы по проектированию железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды473
- В. Д. Афанасьева, А. А. Воробьев, В. Н. Коншина, С. В. Николаев**
Компьютерная программа для определения параметров ультразвукового контроля сварных соединений в железнодорожной, а также в нефтегазотранспортной системах 483
- К. Ф. Исламов, Л. Ф. Казанская**
Цифровизация экологического мониторинга строительного производства на основе технологии «Строительный конвейер»491

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ**

- Е. В. Опарин, Ф. А. Прошин, Е. В. Опарина**
Имитационная модель процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E.... 503
- А. А. Привалов, Д. Д. Титов**
Модель процесса анализа сетевой активности элементов телефонной IP-сети комплексом компьютерной разведки нарушителя.....516

CONTENTS

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

A. S. Adadurov, I. M. Podgrebennyj, A. N. Ivanov, P. I. Tsomaev Modeling the Impact of a Freight Wagon Wheel with Two Non-Rejection Flat Spots on the Railway Track	245
A. A. Miroshnik, A. I. Danilenko The Use of a Special Device for Transporting Links During the Restoration of the Railway Track	255
A. V. Shevchenko Development of the Architecture of a Unified Digital Platform for Integrating Telematics Data of Autonomous Refrigerated Wagons with Russian Railways Corporate Systems Based on Industrial Internet of Things and Blockchain Technologies	264
A. V. Karmanov Calculation of Parasitic Capacitances of an Asynchronous Traction Motor with Variably-Frequency Drives.....	277
A. D. Solov'yov Methods for Protecting Railway Automation and Remote Control Facilities Against Lightning Strikes	288
F. V. Chesnovich Comparative Analysis of Aerial, Mobile and Terrestrial Laser Scanning Technologies for Railway Track Diagnostics: Selection Criteria Based on Accuracy, Productivity and Operational Constraints	299
T. L. Ripol'-Saragosi, L. F. Ripol'-Saragosi, I. A. Yaitskov Theoretical Description of Processes and Relationships in the Absorbing Devices of Traction Units.....	309
I. S. Ponomarev, M. Yu. Obukhov, D. A. Elin, A. M. Evstaf'ev Diagnostics of Traction Electric Motor Units of High-Speed Push-Pull Trains on the Russian Railway.....	315
V. F. Tanaev, A. M. Rogov Improving of Controllability for Freight Train Pneumatic Braking System	326
K. M. Timukhin, M. M. Amanov Selection of a Dislocation Station for Trains Set Aside from Traffic as a Tool for Improving the Efficiency of the Transport System.....	341
S. N. Korzhov, P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov A Method of Reducing the Braking Distance of an Electric Train Car by Improving the Design of the Clamping Mechanism of the Braking Device.....	349
M. A. Shrajber Experimental Studies of Thermomechanical Stresses in Locomotive Asynchronous Electric Motors.....	360
D. V. Yazev, V. V. Kostenko, A. N. Ivankov Simulation of Train Movement Based on Statistical Data Processing	370
E. A. Kajkina, A. V. Novichikhin Development of Methods for Processing Container Flows Based on the Language of Transport and Logistics Facilities	381

**GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**

V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev, Yu. G. Yanko The Influence of the Shape of the Cross-Section of a Cavity-Free Drain on the Dehumidification Efficiency.....	391
V. N. Kavkazskij, E. A. Ermonin Comparative Analysis of Methods for Assessing Initial Displacements of the Near-Face Area in Conditions of Low-Strength Semi-Rocky Soils.....	402
D. V. Veremeev, P. A. Pegin Selection of the Optimal Value of Cylindrical Elements in Tower Structures	417
Ia. V. Mel'nik, A. E. Fiodorov Assessment of the Possibility of Using a New Method for Constructing Underwater Urban Tunnels in Unrelated Silty Soils.....	427
V. A. Nadezhkin, I. S. Bredun Experimental Investigation of Insulating Joint Current vs. Resistance.....	436
A. N. Makarov, P. A. Kravchenko Problems of Emergency Situations When Parking Is Surfaced and Methods of Stabilization by Using an Anchor (Multi-Screw) Pile on the Example of One of the Facilities in St. Petersburg	443
A. A. Shul'gin Stability of the Frame During Progressive Collapse and Exposure to Variable Temperature.....	456
A. A. Sokornov, A. N. Kon'kov Stress-Strain State of the Tunnel Chamber After Renovation of the Ventilation Shaft	462
S. S. Salikhanov, E. S. Karapetov Analysis of the Modern Regulatory Framework for the Design of Reinforced Concrete Bridges Considering Environmental Impact	473
V. D. Afanasyeva, A. A. Vorobyov, V. N. Konshina, S. V. Nikolaev A Computer Program for Determining the Parameters of Ultrasonic Testing of Welded Joints in Railway and Oil and Gas Transportation Systems	483
K. F. Islamov, L. F. Kazanskaya Digitalization of Environmental Monitoring in Construction Production Based on the Construction Conveyor Technology	491

**HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT**

E. V. Oparin, F. A. Proshin, E. V. Oparina Simulation Model of the PTP Protocol Operation in E2E Mode.....	503
A. A. Privalov, D. D. Titov Model for Analyzing Network Activity of Elements in a Telephone IP Network Using an Intruder's Computer Reconnaissance System.....	516



УДК 625.14; 629.4.027.51

Результаты моделирования воздействия колеса грузового вагона с двумя ползунами небраковочного размера на железнодорожный путь

А. С. Ададунов¹, И. М. Подгребенный², А. Н. Иванов³, П. И. Цомаев⁴

¹ Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Россия, 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10, стр. 1

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

³ Дирекция инфраструктуры Октябрьской железной дороги, Россия, 191036, Санкт-Петербург, Невский пр., 85д

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ имени В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197376, Санкт-Петербург, Инструментальная ул., 2

Для цитирования: Ададунов А. С., Подгребенный И. М., Иванов А. Н., Цомаев П. И. Результаты моделирования воздействия колеса грузового вагона с двумя ползунами небраковочного размера на железнодорожный путь // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 245–254. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-245-254

Аннотация

Цель: представить результаты математического моделирования динамического воздействия на железнодорожный путь колеса грузового вагона с двумя ползунами небраковочного размера. Обосновать частые случаи ложных срабатываний систем автоматического контроля, фиксирующих сверхнормативные нагрузки от колес, при визуальном осмотре которых выявляются лишь дефекты, не превышающие браковочные нормы. **Методы:** с использованием расчетной схемы «колесо — рельс» в среде MATLAB исследовано влияние глубины ползунов, скорости движения и расстояния между дефектами на величину ударной нагрузки. Модель пути представлена в виде балки на упругом основании Фусса — Винклера. Для описания ударного взаимодействия использована теория расчета, адаптированная для нескольких последовательно расположенных ползунов. **Результаты:** показано, что совокупное воздействие двух ползунов небраковочного размера может приводить к динамическим нагрузкам, сравнимым или превышающим воздействие одиночного ползуна браковочного размера. Выявлены критические диапазоны скорости (40–65 км/ч) и расстояния между дефектами (50–100 мм), при которых ударное воздействие максимально. **Практическая значимость:** на основании проведенного анализа предлагается учитывать наличие множественных дефектов при нормировании состояния колесных пар для снижения негативного влияния на инфраструктуру пути. Действующие нормативные документы не учитывают суммарного эффекта от нескольких дефектов, что может приводить к ускоренному износу верхнего строения пути, а также к выходу из строя ходовой части вагона.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, колесная пара, ползун, динамическая нагрузка, система «колесо — рельс», математическое моделирование, небраковочный дефект, система «Паук», ударное воздействие, путь

Введение

На данный момент в Российской Федерации нормы допустимого воздействия на же-

лестнодорожный путь регламентируются ГОСТ 34759-2021 «Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на

железнодорожный путь и методы испытаний» [1]. Согласно Правилам технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [2], при обнаружении в пути следования вагона с колесной парой, имеющей ползун глубиной 1 мм (но не более 2 мм) разрешается довести такой вагон без отцепки от поезда до ближайшего пункта технического обслуживания со скоростью не более 70 км/ч для грузовых вагонов.

При глубине ползуна от 2 до 6 мм разрешается следование поезда со скоростью 15 км/ч, а при глубине ползуна от 6 до 12 мм — со скоростью 10 км/ч до ближайшей станции, где колесная пара должна быть заменена. При глубине ползуна более 12 мм разрешается следование со скоростью 10 км/ч при условии исключения возможности вращения колесной пары. В таблице приведены показания автоматизированного рабочего места системы поиска дефектов

поверхности катания «Паук», установленной на Октябрьской железной дороге на станции Веймарн, где красный цвет обозначал, что колесная пара должна быть заменена по показаниям системы, так как дефекты на поверхности катания оказывали сверхнормативное воздействие на путь. Замеры сделаны в период с декабря 2024 года по март 2025 года. Все вагоны были порожними, и ни один не был отцеплен.

Методы решения задачи

Авторы статьи задумались над тем, почему ошибаются системы типа «Паук», и решили провести теоретические исследования. Для этого была изучена теория расчета взаимодействия колеса вагона и рельса с ползуном на поверхности катания за авторством доктора технических наук А. Я. Кога на [3, 4] и адаптирована для расчета нескольких

ТАБЛИЦА. Показания системы «Паук» на Октябрьской железной дороге и фактические замеры дефектов (К — ось необходимо выкатывать, Т — предтревожное состояние, за вагоном необходимо наблюдение)

Номер поезда	Скорость (км/ч)	Расстояние между дефектами	Сторона (лев. / пр.)	Показания системы «Паук»	Виды дефектов	Фактические замеры *	Замена выщербин ползунами аналогичной глубины для расчетов, мм (глубина ₁ / глубина ₂)
1	36	57	Левая	К	Выщербина/ползун	30 × 0,8 / 0,5 мм**	0,3/0,5
2	49	64	Левая	Т	Выщербина/ползун	42 × 1 / 0,5 мм	0,3/0,5
3	50	60	Левая	К	Выщербина/ползун	23 × 2 / 0,8 мм	0,5/0,5
4	74	59	Левая	К	Выщербина/ползун	40 × 1 / 0,8 мм	0,2/0,8
5	38	69	Левая	К	Две выщербин	30 × 4 / 41 × 4 мм	0,5/0,8

Примечания. *Замеры геометрических параметров дефектов (длина и глубина для выщербин, глубина для ползунов) проводились шаблоном абсолютным вагонным (Т447.05.000), поверенной линейкой.

**Формат записи «АВ/С мм»: А — длина дефекта вдоль окружности катания, мм; В — ширина дефекта, мм; С — глубина дефекта, мм. Символ «/» отделяет параметры выщербин от параметров ползуна, для выщербин указывается длина и ширина, для ползуна — глубина.

последовательно расположенных ползунков. Для численных вычислений использовалась программная среда MATLAB. Объектом исследования выступали колебательные процессы в системе «колесо — рельс», вызванные движением по рельсу колеса с несколькими дефектами на поверхности катания. Для анализа этих процессов применяется математическое моделирование взаимодействия колесной пары и железнодорожного пути. Расчетная схема пути представлена в виде балки на упругом основании Фусса — Винклера [4]. Вся модель имеет вид, представленный на рис 1.

Явление удара или динамической силы описывается с помощью уравнения (1) (здесь и далее все формулы из [3, 4]):

$$\ddot{Q}_d = W_Q(u, i\omega)\ddot{\xi}, \quad (1)$$

где $W_Q(u, i\omega)$ — частотная характеристика, м/Н;

ξ — функция вертикальных неровностей, м.

$W_Q(i\omega)$ является частотной характеристикой динамической системы с входом по ускорению сближения колесного центра и центра масс сечения рельса и выходом по динамической силе в контакте колеса и рельса и имеет следующий вид (2):

$$W_Q(i\omega) = \frac{1}{\omega^2 \left[W_Z^Q(u, i\omega) + \frac{1}{C_k^0} - W^0(i\omega) \right]}, \quad (2)$$

где $W_Z^Q(u, i\omega)$ — частотная характеристика системы с входом по динамической силе в контакте колеса и рельса и выходом по прогибу рельса в сечении под этой силой, м/Н;

$W^0(i\omega)$ — частотная характеристика системы с входом по динамической силе в контакте колеса и рельса $Q(t)$ и выходом по вертикальному перемещению колесного центра, м/Н;

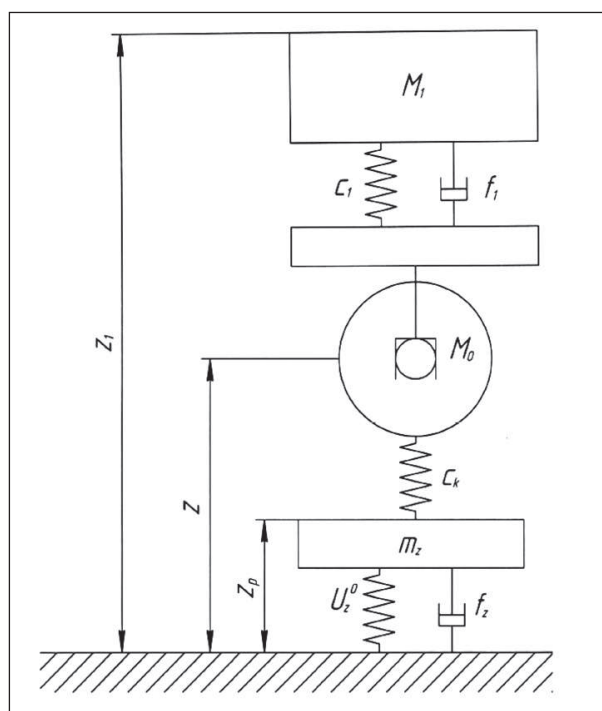


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия системы «колесо — рельс», где:

Z_p — вертикальный прогиб рельса, м;

m_z — распределенная по длине приведенная масса рельса и основания при вертикальных колебаниях пути, кг/м;

U_z^0 — модуль упругости подрельсового основания в вертикальной плоскости, Н/м²;

f_z — распределенное по длине демпфирование пути при вертикальных колебаниях, Н·с/м²;

M_1 — обрессоренная масса, приходящаяся на одно колесо, кг;

M_0 — необрессоренная масса, приходящаяся на одно колесо, кг;

f_1 — демпфирование в связи обрессоренной и необрессоренной масс, Н·с/м;

Z — вертикальные перемещения колесного центра, м;

Z_1 — вертикальные перемещения обрессоренной массы, м;

C_1 — жесткость связи обрессоренной и необрессоренной масс, Н/м;

C_k — жесткость в контакте колеса и рельса, Н/м.

C_k^0 — жесткость в контакте колеса и рельса, Н/м.

Расстояние между соседними импульсами равно длине окружности по кругу катания. Длина ползуна e_n (м) может быть определена по его глубине h (м) и радиусу r (м) формула (3):

$$e_n = 2\sqrt{2rh}. \quad (3)$$

Траектория движения колеса с ползуном описывается уравнением (4):

$$\xi(vt) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ \frac{r\omega^2 t^2}{2} & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{\alpha}{2\omega_0}; \\ \frac{r(\alpha - \omega_0 t)^2}{2} & \text{при } \frac{\alpha}{2\omega_0} \leq t \leq \frac{\alpha}{\omega_0}; \\ 0 & \text{при } \frac{\alpha}{\omega_0} \leq t, \end{cases} \quad (4)$$

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

$\xi(vt)$ — вертикальное смещение центра колеса, м;

t — время, с.

Выражение для спектра Фурье функции $\xi(vt)$ имеет вид $F(\xi)$ — (5):

$$F(\xi) = -2 \left[\left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \frac{e_n}{2} - r \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^3 \sin(\omega T) \right] \times \exp(-i\omega T) \sum_{n=1}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_0), \quad (5)$$

где $\omega_0 = \frac{v}{r}$ — угловая скорость вращения колеса, рад/с;

$T = \frac{e_n}{2v}$ — время запаздывания, с;

n — номер гармоники;

v — скорость движения вагона, м/с.

Подставив выражение (5) в формулу (1) и проведя операцию обратного преобразования Фурье, получим выражение (6), определяющее динамические силы $Q_n(t)$, Н, в контакте

колеса, имеющего ползун на поверхности катания, и рельса:

$$Q_n(t) = -\frac{\omega_0^2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(e_n - \frac{2r}{n} \sin\left(n \frac{e_n}{2r}\right) \right) |W_Q(in\omega_0)| \times \cos[n\omega_0(t-T) + \arg W_Q(in\omega_0)], \quad (6)$$

где i — мнимая единица.

Данная сила рассчитывается для каждого ползуна отдельно и учитывается путем задания временной задержки, которая сдвигает воздействие второго ползуна относительно первого. Совместное влияние двух дефектов определяется суммированием их вкладов в каждой гармонике.

Анализ полученных результатов

В ходе анализа сначала были проведены расчеты для колес с одним ползуном и разной глубиной ($h_1 = 0,8$ мм; $h_2 = 1,0$ мм; $h_3 = 1,2$ мм) при скорости движения порожнего вагона равной $V = 40$ км/ч, а также $M_0 = 994$ кг, $M_1 = 2875$ кг, $C_k = 500$ МН/м, $C_1 = 2$ МН/м.

На рис. 2 показаны основные фазы удара одиночного ползуна:

- фаза обезгруживания, $t = 0,268$ с;
- фаза импульсного изменения силы при взаимодействии ползуна с рельсом, $t = 0,27$ с;
- фаза последствий, $t = 0,273$ с.

Из графиков видно, что с увеличением глубины ползуна ударная нагрузка возрастает. Далее исследуем влияние скорости движения колеса с ползуном на величину ударной нагрузки для таких же параметров $M_0 = 994$ кг, $M_1 = 2875$ кг, $C_k = 500$ МН/м, $C_1 = 2$ МН/м, которые не будут меняться для всех последующих вычислений (рис. 3).

Как видно на рис. 3, с ростом скорости ударные нагрузки увеличиваются, но при достижении определенного порога (50 км/ч) начинают снижаться. Это объясняется двумя типами взаимодействия ползуна с рельсом. В первом

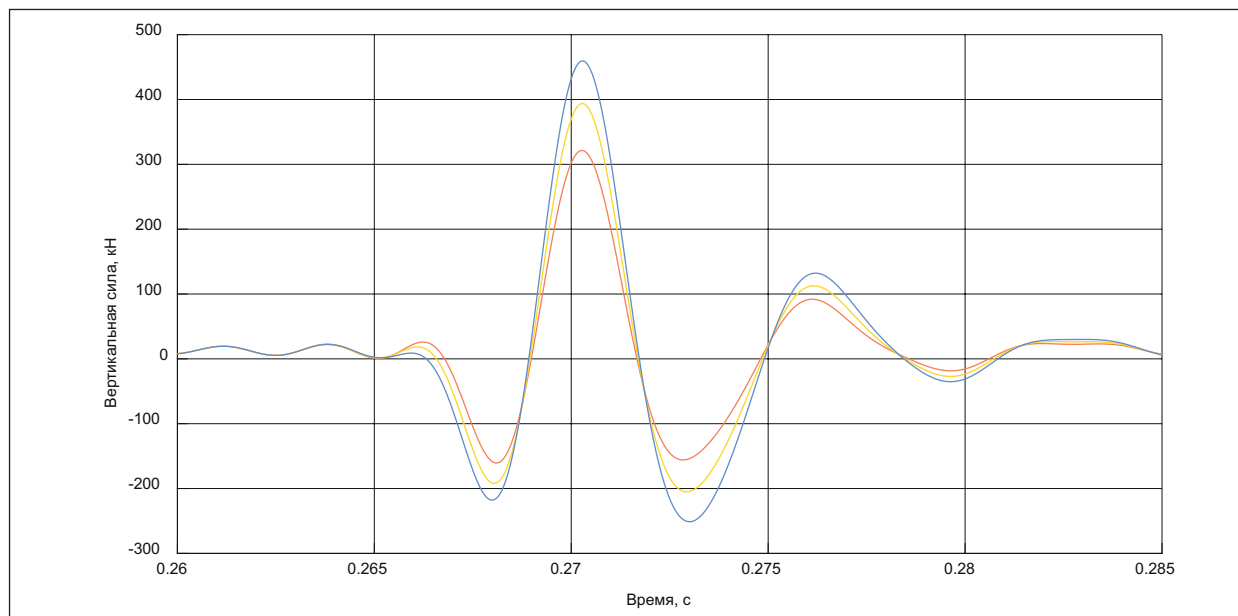


Рис. 2. Влияние глубины ползуна на ударное воздействие колеса: красная кривая для ползуна глубиной $h = 0,8$ мм; желтая кривая ($h = 1,0$ мм); синяя кривая ($h = 1,2$ мм)

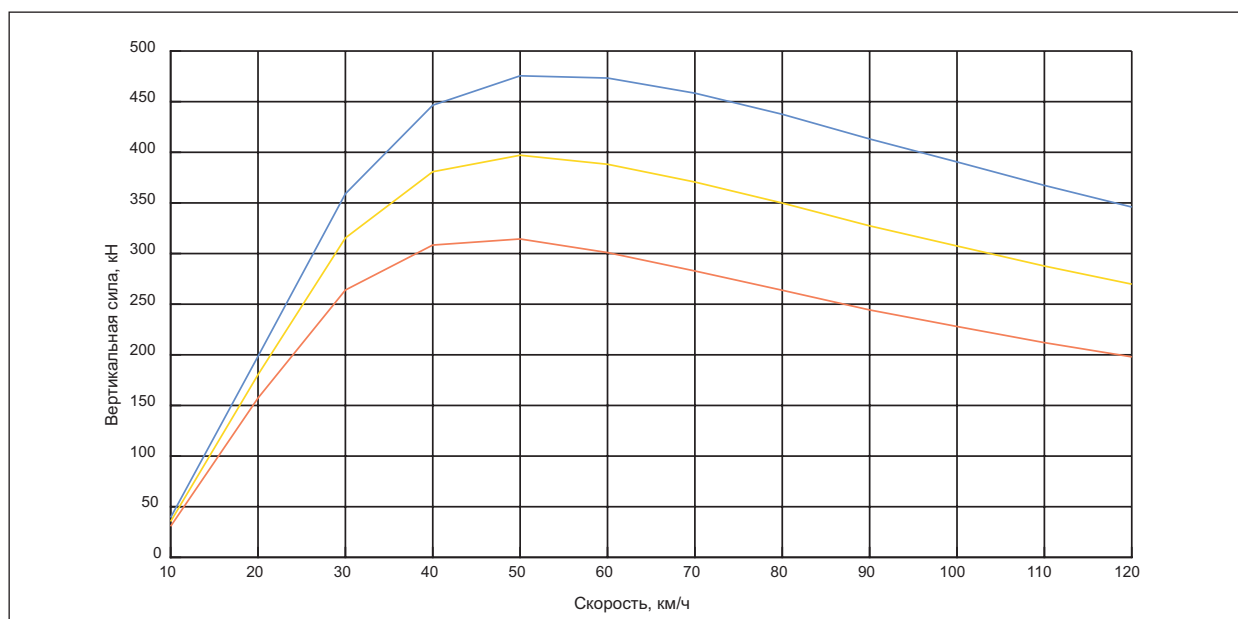


Рис. 3. Зависимость ударного воздействия от скорости движения: красная кривая ($h = 0,8$ мм), желтая кривая ($h = 1,0$ мм), синяя кривая ($h = 1,2$ мм)

случае колесо накатывается на первую грань ползуна и относительно этой грани происходит его вращение с последующим ударом и далее колесо начинает вращаться относительно

второй грани. Во втором случае при достижении определенной скорости колесо начинает отрываться от рельса. Между ними образуется расстояние, и колесо проворачивается (рис. 4).

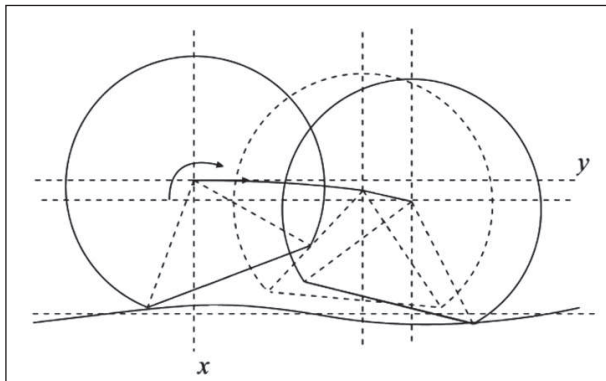


Рис. 4. Траектория движения колеса с ползуном с учетом отрыва от рельса [4]: две сплошные окружности — положения колеса до и после отрыва; пунктирная окружность — положение колеса в момент отрыва; жирная изогнутая линия внутри окружностей — траектория центра колеса при отрыве

В данной методике расчета удар одиночного ползуна о рельс представлен в виде гармонических колебаний. Для имитации удара вто-

рого ползуна была рассчитана дополнительная гармоника и учтена с использованием теоремы запаздывания [5]. В расчетах учитывались следующие параметры: $d = 60$, расстояние между ползунами, мм; $V = 50$, скорость движения вагона, км/ч; h_1 и h_2 — глубины первого и второго ползуна, мм.

Различие в абсолютных значениях вертикальных сил на рис. 2 (одиночные дефекты) и рис. 5 (парные дефекты) обусловлено разными исходными данными (глубины, скорости, количеством дефектов) и целью сравнения. На рис. 2 сравнивается влияние разных глубин одиночного дефекта, а на рис. 5 — влияние разных комбинаций двух дефектов. Важен сравнительный вывод: воздействие от двух небраковочных дефектов (синий график на рис. 5) сопоставимо по амплитуде с воздействием от одиночного браковочного дефекта глубиной 1,2 мм (синий график на рис. 2). Это связано с тем, что первый ползун увеличивает ударное

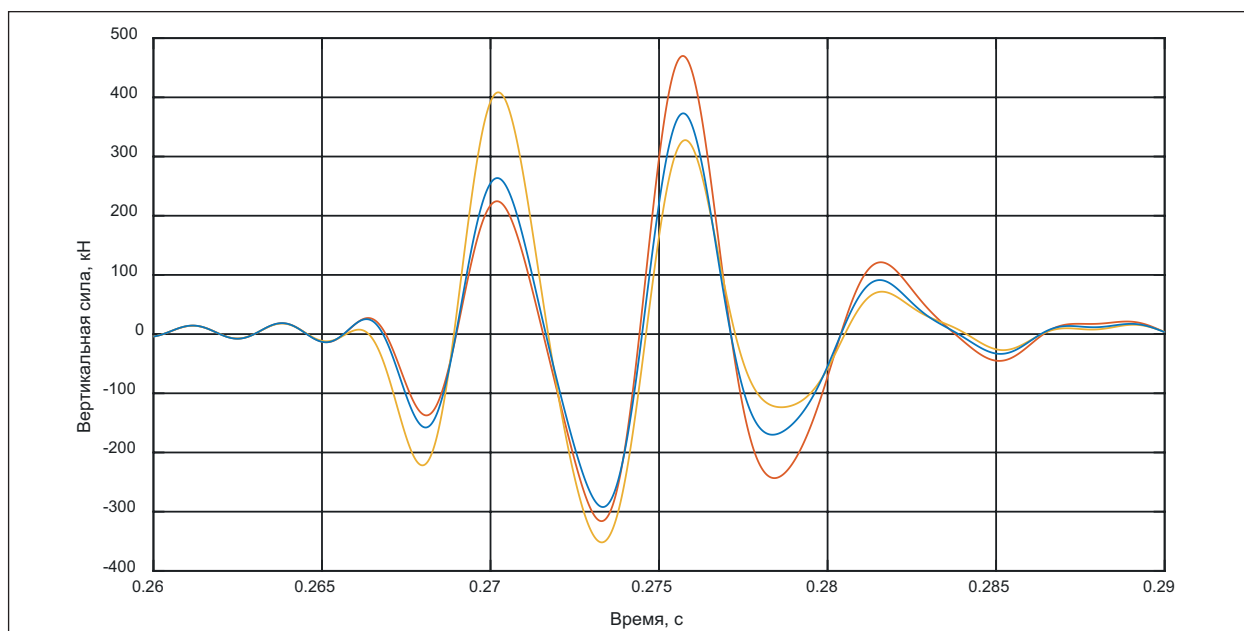


Рис. 5. Влияние двух ползунов различной глубины на динамические нагрузки: красная кривая — два ползуна ($h_1 = 1,1$ мм, $h_2 = 0,6$ мм); желтая кривая — два ползуна ($h_1 = 0,6$ мм, $h_2 = 1,1$ мм); синяя кривая — два ползуна ($h_1 = 0,7$ мм, $h_2 = 0,8$ мм)

влияние второго, последовательно идущего ползуна.

На рис. 5 видно, что влияние двух ползунков небраковочного размера (синий график) сопоставимо с влиянием одного ползуна браковочного размера, рассмотренного на рис. 2 (желтый график). Это связано с тем, что первый ползун увеличивает ударное влияние второго последовательно идущего ползуна. Оценим влияние скорости движения колеса с несколькими ползунами на силу удара. Для этого возьмем первые 5 поездов из табл. 2, рассчитаем глубины ползунков h_1 и h_2 , учитывая l — длину ползуна, мм, по формуле 9 [3]:

$$h = \frac{l^2}{8r}. \quad (9)$$

Как видно, расчетное воздействие в момент измерения системой «Паук» на путь вагона

№ 1 — 197 кН, № 2 — 199 кН, № 3 — 84 кН, № 4 — 317 кН, № 5 — 224 кН. Дефекты вагона № 5 на скорости 40 км/ч оказывали воздействие на путь около 345 кН.

Различие в абсолютных значениях сил на рис. 3 (одиночный дефект) и рис. 6 (парные дефекты) объясняется принципиально разным характером динамического отклика системы при наличии одного и двух возмущений. Наличие второго дефекта приводит к интерференции ударных импульсов и изменению резонансных свойств системы, что отражается на результирующих нагрузках. В связи с этим была построена зависимость ударной нагрузки от скорости и расстояния между ползунами $h_1 = 0,6$ мм, $h_2 = 1,1$ мм (рис. 7). По полученным данным можно сделать вывод, что наибольшее ударное воздействие на путь во всех трех случаях возникает при движении

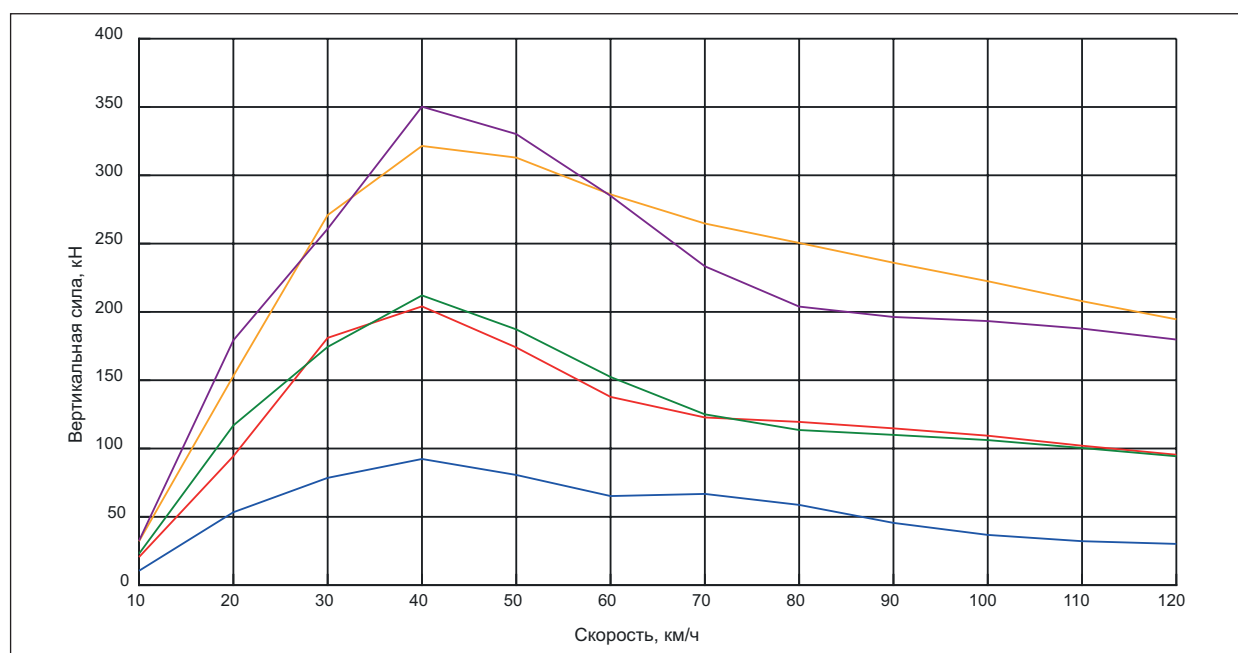


Рис. 6. Влияние скорости движения вагона на величину ударного воздействия колеса с двумя ползунами: красная кривая — вагон № 1 ($h_1 = 0,3$ мм, $h_2 = 0,5$ мм, $d = 57$ мм); зеленая кривая — вагон № 2 ($h_1 = 0,3$ мм, $h_2 = 0,5$ мм, $d = 64$ мм); синяя кривая — вагон № 3 ($h_1 = 0,5$ мм, $h_2 = 0,5$ мм, $d = 60$ мм); оранжевая кривая — вагон № 4 ($h_1 = 0,2$ мм, $h_2 = 0,8$ мм, $d = 59$ мм); сиреневая кривая — вагон № 5 ($h_1 = 0,5$ мм, $h_2 = 0,8$ мм, $d = 69$ мм)

вагона со скоростью в диапазоне от 40 до 65 км/ч с расстоянием между ползунами от 60 до 100 мм. Таким образом, показания системы «Паук», установленной на станции Веймарн, были бы верны, если бы колесная пара браковалась не по размеру дефекта, а по уровню воздействия на путь.

Обсуждение и заключение

Результаты математического моделирования показали, что наличие двух ползунов невыбраковочного размера может приводить к динамическим нагрузкам, сравнимым или превышающим воздействие одиночного браковочного дефекта. Критическими с точки зрения максимума ударного воздействия являются диапазоны скорости 40–65 км/ч и расстояния между дефектами 50–100 мм.

Проведенный сравнительный анализ с зарубежными исследованиями [6–8] и нормативными документами [9, 10] показывает общность проблемы ложных срабатываний систем диагностики и недостаточный учет кумулятивного эффекта от множественных малозначительных дефектов в действующих нормах большинства стран.

Действующие нормативные документы, включая российские ПТЭ [2] и стандарты [1], не учитывают суммарное влияние нескольких дефектов, что может приводить к необоснованному продлению эксплуатации колесных пар и ускоренному износу верхнего строения пути. В связи с этим предлагается инициировать рассмотрение вопроса о внесении изменений в нормативную базу для учета наличия множественных дефектов при оценке состояния колесных пар. В будущем авторами планируется верификация разработанной модели по результатам натурных экспериментов, что позволит повысить достоверность расчетов и обоснованность предлагаемых изменений.

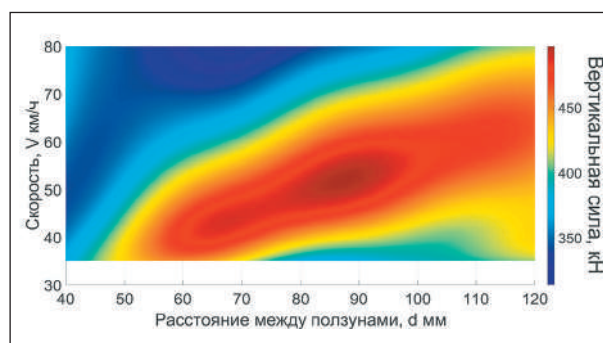


Рис. 7. Рассчитанные зависимости ударной нагрузки от скорости движения вагона и расстояния между ползунами ($h_1 = 0,6$ мм; $h_2 = 1,1$ мм)

Список источников

- ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2021.
- Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: приказ Минтранса России от 23.06.2022 № 250.
- Коган А. Я., Никитин Д. А., Полещук И. В. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колес и рельса // Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2007. С. 166–176.
- Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом // Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2023. 276 с.
- Леннинг Дж. Х., Беттин Р. Г. Случайные процессы в задачах автоматического управления. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. С. 132–137.
- Jin, X., Wen Z. Effect of Discrete Wheel / Rail Contact on the Wheel / Rail Interaction and Surface Initiated Rolling Contact Fatigue in Railways // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 293, no. 3–5. Pp. 818–831.
- Li X., Jespersen M. H., Andersen J. O. Modelling of Wheel Flats and Its Impact on Vehicle-Track

Interaction // Vehicle System Dynamics. 2020. Vol. 58, no. 4. Pp. 527–548.

8. ERRI D 202. Wheel defects — Impact on Track Loading and Derailment Risk. Utrecht: European Rail Research Institute, 1999.

9. AAR Manual of Standards and Recommended Practices. Wheels and Axles. Washington: Association of American Railroads, 2023.

10. EN 15313:2016. Railway Applications — In-Service Wheelset Operation Requirements — In-Service and Off-Vehicle Wheelset Maintenance. Brussels: CEN, 2016.

Дата поступления: 13.03.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

АДАДУРОВ Александр Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент; i@vorudada.ru

ПОДГРЕБЕННЫЙ Илья Максимович — студент; Podg_I@mail.ru

ИВАНОВ Александр Николаевич — аспирант; v_ivanovan@orw.rzd.ru

ЦОМАЕВ Павел Илларионович — аспирант; pav.tsomaev@mail.ru

Modeling the Impact of a Freight Wagon Wheel with Two Non-Rejection Flat Spots on the Railway Track

A. S. Adadurov¹, I. M. Podgrebennyj², A. N. Ivanov³, P. I. Tsomaev⁴

¹ Scientific Research Institute of Railway Transport (JSC “VNIIZHT”), bldg. 1, 10 Mytischinskaya 13rd st., Moscow, 129626, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

³ Directorate of Infrastructure of the October Railway, 85D Nevsky ave., St. Petersburg, 191036, Russia

⁴ Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 2 Instrumentalnaya st., St. Petersburg, 197376, Russia

For citation: Adadurov A. S., Podgrebennyj I. M., Ivanov A. N., Tsomaev P. I. Modeling the Impact of a Freight Wagon Wheel with Two Non-Rejection Flat Spots on the Railway Track // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 245–254. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-245-254 (In Russian)

Abstract

Objective: to present the results of mathematical modeling of the dynamic impact on the railway track of a freight car wheel with two non-rejection size flat spots. To substantiate the frequent cases of false activations of automatic control systems that record excess loads from wheels, during visual inspection of which only defects that do not exceed rejection standards are detected. **Methods:** using the “wheel — rail” calculation scheme in the MATLAB environment, the influence of the flat spot depth, speed, and distance between defects on the impact load magnitude was investigated. The track model is represented as a beam on a Fuss — Winkler elastic foundation. To describe the impact interaction, a calculation theory adapted for several sequentially located flat spots was used. **Results:** the results showed that the combined impact of two non-rejection size flat spots can lead to dynamic loads comparable to or exceeding the impact of a single rejection size flat spot. Critical speed ranges (40–65 km/h) and distances between defects (50–100 mm) at which the impact is maximum have been identified. **Practical importance:** based on the analysis, it is proposed to consider the presence of multiple defects when standardizing the condition of wheelsets to reduce the negative impact on track infrastructure. Current regulatory documents do

not consider the cumulative effect of multiple defects, which can lead to accelerated wear of the track superstructure, as well as to the failure of the wagon running gear.

Keywords: railway transport, wheelset, flat spot, dynamic load, “wheel — rail” system, mathematical modeling, non-rejection defect, Pauk system (Automatic Derailment Control System), impact, track

References

1. GOST 34759-2021. “Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav. Normy dopustimogo vozdejstviya na zheleznodorozhnyj put' i metody ispytaniy” [Railway Rolling Stock. Standards for Permissible Impact on Railway Tracks and Test Methods], Moscow, Standartinform, 2021. (In Russian)
2. Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossijskoj Federatsii [On Approval of the Rules for the Technical Operation of Railways in the Russian Federation], Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation, dated June 23, 2022, no. 250. (In Russian)
3. Kogan A. Ya., Nikitin D. A., Poleshchuk I. V. Kolebaniya puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya ekipazhej i udarnom vzaimodejstvii koles i rel'sa [Track Vibrations at High Carriage Speeds and Impact between Wheels and Rails], *Trudy VNIIZhT [Russian Railway Science Journal]*, Moscow, Intekst, 2007, pp. 166–176. (In Russian)
4. Kogan A. Ya. Dinamika puti i ego vzaimodejstvie s podvizhnym sostavom [The Dynamics of the Track and Its Interaction with the Rolling Stock], *Trudy VNIIZhT [Russian Railway Science Journal]*, Moscow, Intekst, 2023, 276 p. (In Russian)
5. Lenning Dzh. Kh., Bettin G. Sluchajnye protsessy v zadachakh avtomaticheskogo upravleniya [Random Processes in Automatic Control Tasks], Moscow, Izdatel'stvo inostranoj literatury [Foreign Languages Publishing House], 1958, pp. 132–137. (In Russian)
6. Jin, X., Wen, Z. Effect of Discrete Wheel / Rail Contact on the Wheel, Rail Interaction and Surface Initiated Rolling Contact Fatigue in Railways, *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 293, no. 3–5, pp. 818–831.
7. Li X., Jespersen M. H., Andersen J. O. Modelling of Wheel Flats and Its Impact on Vehicle-Track Interaction, *Vehicle System Dynamics*, 2020, vol. 58, no. 4, pp. 527–548.
8. ERRI D 202. Wheel Defects – Impact on Track Loading and Derailment Risk. Utrecht, European Rail Research Institute, 1999.
9. AAR Manual of Standards and Recommended Practices. Wheels and Axles, Washington, Association of American Railroads, 2023.
10. EN 15313:2016. Railway Applications – In-Service Wheelset Operation Requirements — In-Service and Off-Vehicle Wheelset Maintenance, Brussels, CEN, 2016.

Received: March 13, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Aleksandr S. ADADUROV — PhD in Engineering, Associate Professor; i@vorudada.ru

Il'ya M. PODGREBENNYJ — Student; Podg_I@mail.ru

Aleksandr N. IVANOV — Postgraduate Student; v_ivanovan@orw.rzd.ru

Pavel I. TSOMAIEV — Postgraduate Student; pav.tsomaev@mail.ru

УДК 625.1

Применение специального устройства для транспортировки звеньев при восстановлении железнодорожного пути

А. А. Мирошник¹, А. И. Даниленко²

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

² Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации, Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8

Для цитирования: *Мирошник А. А., Даниленко А. И.* Применение специального устройства для транспортировки звеньев при восстановлении железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 255–263. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-255-263

Аннотация

Цель: повышение эффективности транспортировки звеньев железнодорожного пути, а также сокращение количества обслуживающего персонала при восстановлении железных дорог. **Методы:** в исследовании использованы методы анализа и сравнительной оценки альтернативных способов укладки верхнего строения пути. **Результаты:** подготовлены предложения по совершенствованию раздельно-конвейерного способа укладки железнодорожного пути. **Практическая значимость:** устройство для транспортировки звеньев железнодорожного пути можно рекомендовать при восстановлении железных дорог, например, в районе проведения специальной военной операции.

Ключевые слова: верхнее строение пути, восстановление железных дорог, раздельно-конвейерный способ, материально-техническое обеспечение, устройство для транспортировки звена железнодорожного пути

Введение

Восстановление железных дорог рассматривается как один из основных элементов транспортного обеспечения операций [1, 2]. Под восстановлением объекта будем понимать комплекс работ, проводимых либо непосредственно на разрушенном объекте, либо в обход разрушенного объекта в целях восстановления сквозного движения поездов через этот объект. Заблаговременная подготовка исходных данных повышает оперативность обоснования предложений по восстановлению объектов сети железных дорог в операции.

Выбирая оптимальные (возможные) места (рис. 1), способы заготовки и возможность (целесообразность) доставки материалов, необхо-

димо учитывать альтернативные способы укладки верхнего строения пути (далее — ВСП) [3–8].

При ограниченных, но часто повторяемых объемах разрушений верхнего строения пути существующие варианты организации и способы производства путевых работ могут оказаться неэффективными или малоэффективными. Решение, например, на восстановление разрушенного моста на ближнем обходе влечет за собой необходимость укладки пути в объеме до 2–3 км. Возникает необходимость выбора таких способов восстановления верхнего строения пути, которые позволили бы оперативно, с наименьшими затратами использовать имеющиеся силы (рис. 2) и средства для восстановления прерванного движения поездов [9, 10].

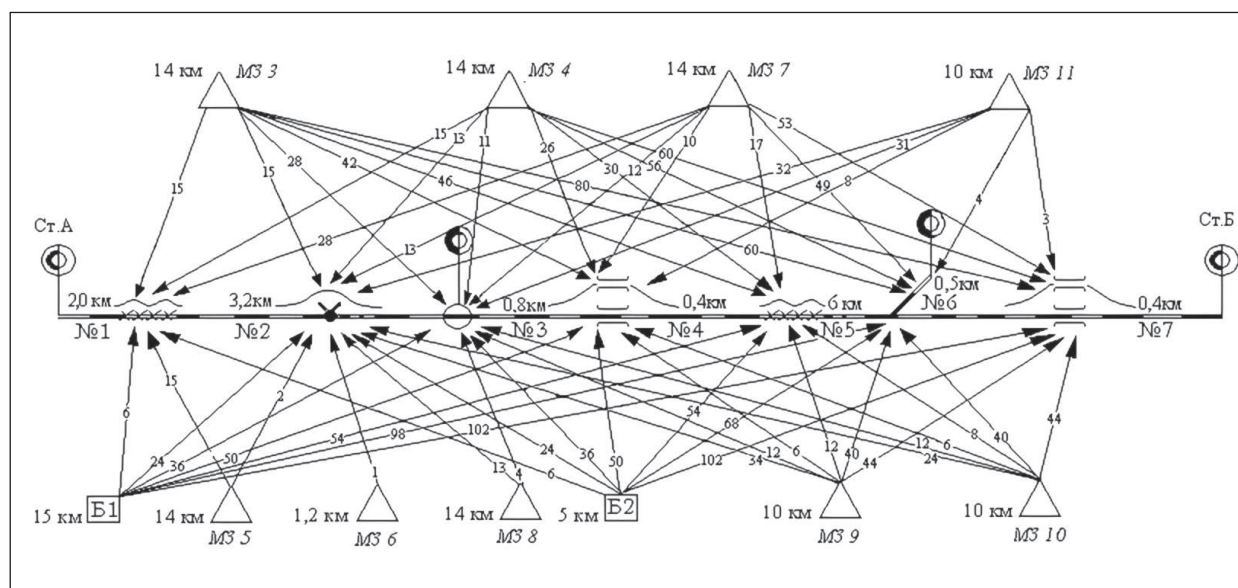


Рис. 1. Плечи подвоза материалов ВСП от мест заготовки

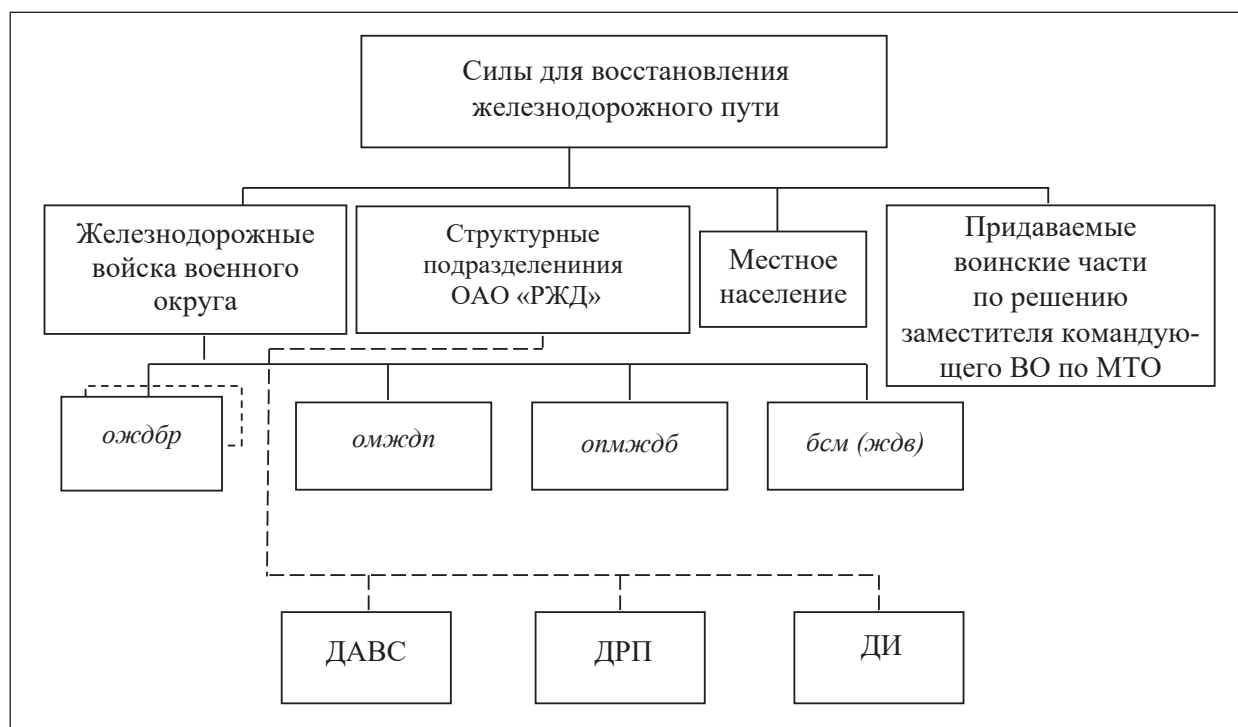


Рис. 2. Силы для восстановления железнодорожного пути (структура и состав)

Существует ряд способов, позволяющих эффективно реализовать вышеизложенное условие. Одним из них является раздельно-конвейерный способ укладки пути.

Постановка задачи

При планировании путевых работ на восстанавливаемом участке одной из основных задач является выбор способов восстановления ВСП.

Работы по укладке пути, в зависимости от объемов и условий их выполнения, можно разделить на два варианта их организации: сборка звеньев пути с последующей их транспортировкой в район и к месту укладки с помощью высокопроизводительных укладочных средств, а также раздельная укладка пути из элементов, отдельно доставляемых к месту восстановления.

При больших объемах работ значительные затраты на механическую сборку готового пути, двойную или тройную погрузку-выгрузку его элементов и конструкций можно компенсировать за счет высокопроизводительных путеукладочных средств, таких как консольный путеукладочный кран УК-25, порталный тракторный путеукладчик ПБ-3М, стреловые краны (вариант 1).

Очевидно, что при подаче готовых звеньев на железнодорожных платформах и их укладке укладочным краном УК-25 трудозатраты будут небольшие (123 чел. ч), а темп укладки большой (1–2 км/ч).

Такой способ организации необходим для выполнения большого объема укладочных работ за сравнительно небольшой промежуток времени. Это характерно для работы путеукладочных кранов ПМС ОАО «РЖД», когда в течение небольшого перерыва в движении поездов — 2–4-часовых окон — необходимо демонтировать и уложить вновь до 2 км РШР.

Консольный путеукладочный кран УК-25 имеет высокую техническую почасовую (до 1–2 км/ч) и годовую (несколько десятков километров в год) производительность. Но это тяжелый кран, работающий только с пути. По этой причине железнодорожные войска путеукладочными средствами такого типа не располагают.

Опыт строительства железных дорог свидетельствует о том, что боковой завоз готовых звеньев для их укладки с помощью табельного

путеукладчика ПБ-3М неэффективен из-за отсутствия необходимого количества специальных транспортных средств и хороших дорог (особенно в районе укладки), а также больших затруднений и затрат при перегрузке звеньев на путевые тележки ПТ-13. К тому же днем в непогоду и ночью перевозка звеньев пути автотранспортом чрезвычайно опасна.

Доставка к путеукладчику готовых звеньев по железной дороге в военное время маловероятна. Кроме того, если звеносборочная база оторвана от восстанавливаемого участка и отсутствуют оборудованные платформы, обстоятельства могут вынудить принять решение на использование необорудованных платформ. В этом случае приходится на станции, примыкающей к объекту восстановления, осуществлять перегрузку звеньев на путевые тележки ПТ-13, что приводит к значительному увеличению трудозатрат.

Очевидно, что укладка пути готовыми звеньями значительно осложнится при необходимости выполнения небольших (до 2 км) рассредоточенных объемов работ в разных местах по готовности земляного полотна, особенно в условиях, где часто отсутствуют притрассовые дороги и частые естественные препятствия не дают возможности доставлять и подавать готовые звенья по железной дороге и боковым завозом. Эти же условия осложняют использование табельного ПБ-3М.

Так, ограниченное количество транспортных средств, а главное, затрудненные условия или отсутствие возможности доставки готовых звеньев к восстанавливаемому объекту могут вынудить принять решение о восстановлении верхнего строения пути раздельным способом (вариант 2).

Известно, что раздельная укладка пути применяется при небольших объемах работ, при этом их трудоемкость увеличивается на

30–45 % по сравнению со звеньевым способом, а темпы укладки пути значительно снижаются.

По этим причинам на этапе принятия решения по организации восстановления верхнего строения пути решается задача выбора наиболее эффективных способов производства путеукладочных работ, в зависимости от сложившейся обстановки, а также наличия сил и средств для их выполнения.

При сравнении способов и выборе наиболее эффективного по критерию минимальной трудоемкости целесообразно решать и оптимизационные задачи по определению областей рационального использования того или иного способа производства работ.

Результаты исследования

Для решения оптимизационной задачи строятся графики зависимостей трудозатрат от длины восстанавливаемого участка (рис. 3).

Точка пересечения двух прямых X определяет число звеньев, при котором трудозатраты по рассматриваемым способам равны.

Анализ графика позволяет сделать вывод о том, что, если объемы путеукладочных работ на восстанавливаемом участке не превышают значения X , по критерию минимума трудозатрат эффективным будет являться раздельный способ укладки пути вручную. При объемах работ, превышающих значение X , эффективнее звеньевой способ с применением ПБ-3М.

Затраты времени на сборку готовых звеньев с использованием стенов-шаблонов и их транспортировку под укладку на специальных роликах составляют 7 ч. и 3 ч. соответственно. Таким образом, за одну 10-часовую смену возможно собрать и доставить под укладку 21 звено рельсошпальной решетки, что составляет 525 м пути.

Рассмотрим возможность использования раздельно-конвейерного способа для доставки собранных звеньев из района их сборки к месту укладки.

С целью доставки звеньев к месту укладки на собранные звенья путевой решетки по мере их изготовления устанавливаются по длине звена специальные ролики, с помощью которых

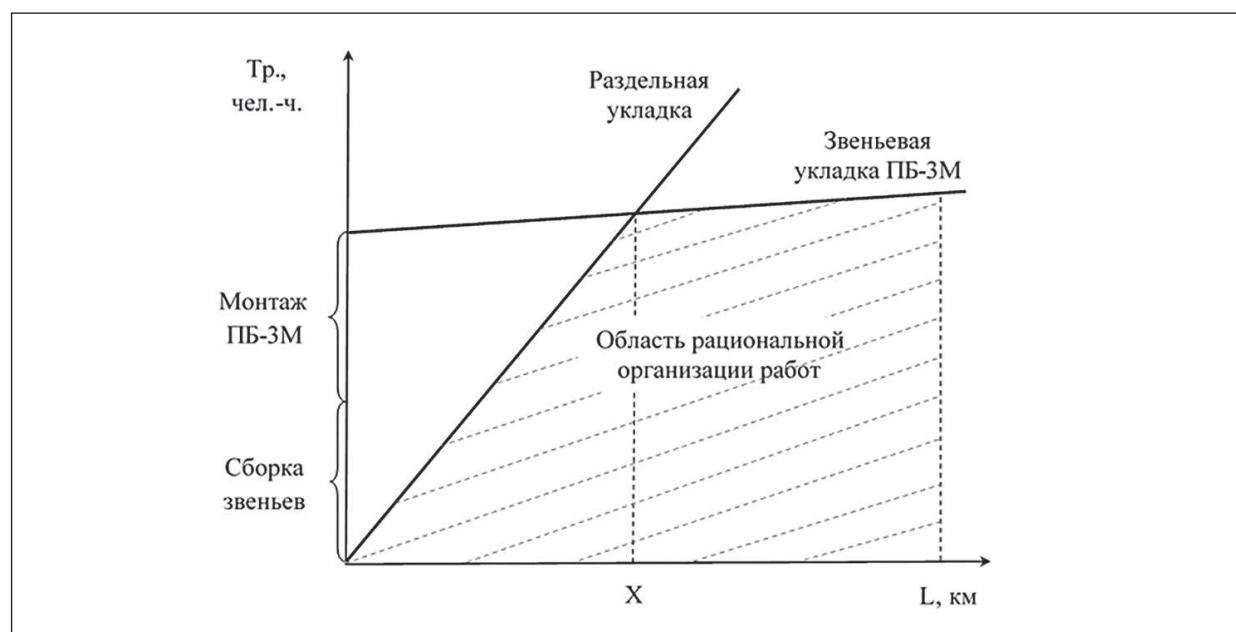


Рис. 3. Фрагмент графика для определения области рациональной организации работ

они транспортируются к месту укладки по сохранившемуся или вновь укладываемому пути. Укладка пути производится путем захвата переднего конца транспортируемого звена и перемещением его вдоль ранее уложенного до размещения установленной на втором конце звена роликовой опоры у конца уложенного звена.

Затем укладываемое звено приподнимается для снятия роликовой опоры, опускается на балластный слой и стыкуется с ранее уложенным звеном (рис. 4).

Укладка звеньев пути производится специальным оборудованием, разработанным на базе машины УПМ-1 с тягачом Т-158. На данный момент машина УПМ-1 на вооружении в железнодорожных войсках не стоит. В качестве наиболее эффективного средства для этой

цели можно предложить «Урал-4320-19» на комбинированном ходу с гидравлическим краном, предназначенным для поездной и маневровой работы, подачи звеньев под путеукладчик, доставки грузов к месту работ, а также используемым в качестве тягача.

Так, весь процесс восстановления участка рассматриваемым способом состоит из трех взаимозависимых и неразрывных элементов: сборки, транспортировки, укладки пути. Производительность укладки, таким способом, будет определяться технической производительностью сборки звеньев и их транспортировки.

Раздельно-конвейерный способ укладки пути наиболее эффективен при небольших объемах путевых работ в прямых и кривых участках железнодорожного пути, когда в течение одной

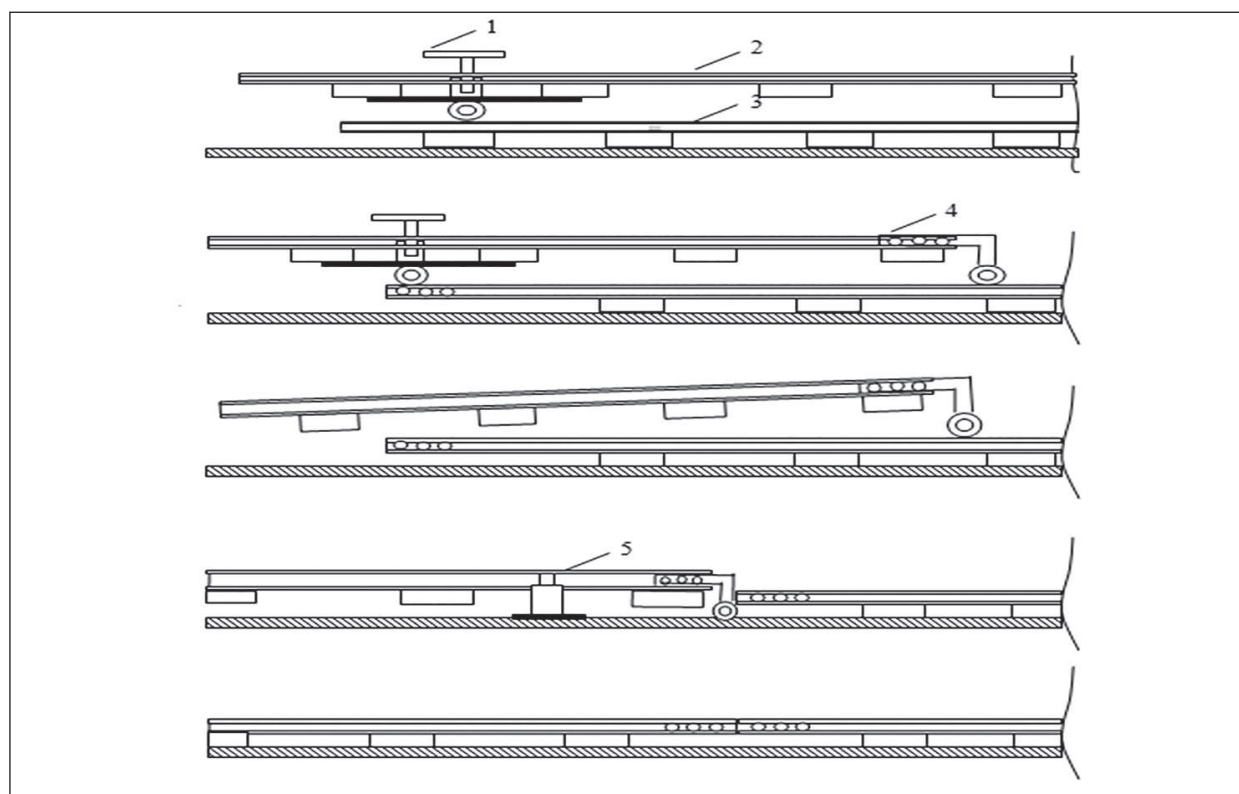


Рис. 4. Последовательность укладки рельсошпальной решетки раздельно-конвейерным способом:

- 1 — промежуточный съемный ролик; 2 — укладываемое звено рельсошпальной решетки;
3 — ранее уложенное звено; 4 — концевой съемный ролик; 5 — домкрат

смены требуется уложить до 500–600 м пути. Вышеуказанный способ укладки пути можно применять в кривых малых радиусов.

Преимуществом рассматриваемого способа является его мобильность, возможность быстрой переброски с одного объекта работ на другой, не привязываясь к существующей сети железных дорог. Для его реализации требуется минимум машин, механизмов и личного состава.

Основной недостаток способа заключается в том, что длина транспортируемых и укладываемых звеньев не должна превышать 12,5 м. При укладке более длинных звеньев при скатывании транспортируемого звена с ранее уложенного в его середине возникает прогиб и шпалы упираются в балласт, препятствуя дальнейшему скатыванию транспортируемого звена.

В целях устранения указанного недостатка и обоснования эффективной области использования раздельно-конвейерного способа укладки пути предлагается целесообразным внести предложения по его совершенствованию.

В целях совершенствования раздельно-конвейерного способа укладки пути представляется возможным использование дополнительно разработанных механизмов и устройств, позволяющих избежать указанных недостатков. В качестве таких устройств предлагается использование съемных колес [9].

Съемные колеса предназначены для транспортировки звеньев рельсошпальной решетки по основной площадке земляного полотна (рис. 5).

Решение поставленной задачи достигается за счет того, что на неподвижную раму (2), имеющую неподвижный упор (5), устанавливается опорное колесо (1); неподвижная рама имеет ползун с направляющими (3) и винт затяжки ползуна (4) для крепления съемного колеса на рельсе транспортируемого звена (6) [9].

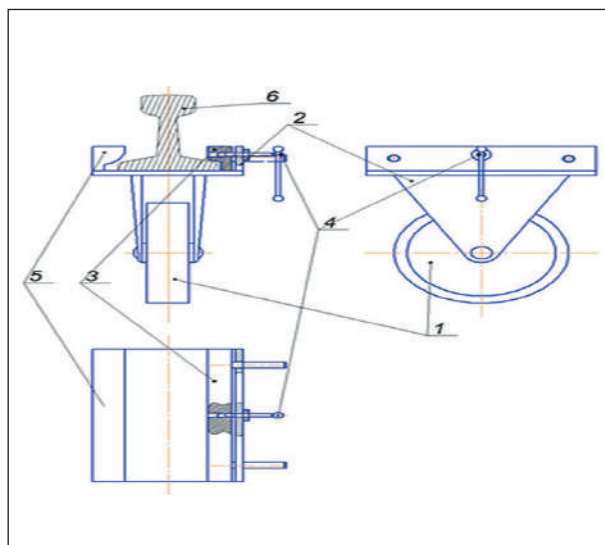


Рис. 5. Съемное колесо, применяемое при раздельно-конвейерном способе укладки ВСП

Технической задачей, решаемой данным специальным устройством, являются:

- универсальность транспортировки звена железнодорожного пути;
- отсутствие необходимости использования погрузочных средств;
- легкость монтажа съемного колеса с опорной частью рельса звена железнодорожного пути за счет крепежного механизма, состоящего из ползуна с направляющими, и винтом ползуна.

Представленная полезная модель может быть эффективно использована в раздельно-конвейерном способе укладки пути.

При перемещении укладываемого звена вдоль ранее уложенного после снятия передних концевых и промежуточных роликов на место промежуточных роликов устанавливаются съемные колеса (рис. 6). Середина укладываемого звена продолжает перемещаться по грунту на съемных колесах до размещения установленной на втором конце звена роликовой опоры у конца уложенного звена. После этого съемные колеса

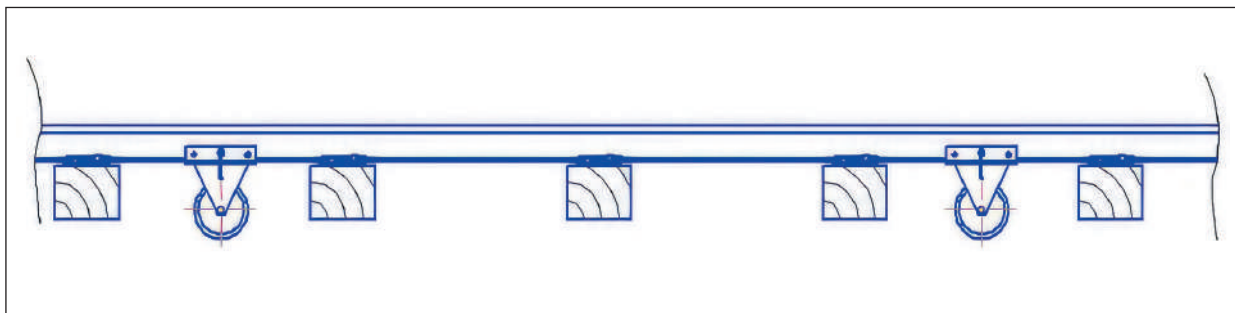


Рис. 6. Транспортировка звеньев рельсошпальной решетки на съемных колесах

и концевые ролики демонтируются и звено укладывается на балласт.

Так, применение съемных колес препятствует прогибу укладываемого звена.

За счет представленной модели возможна укладка более длинных звеньев рельсошпальной решетки.

Заключение

Разработанная модель позволяет восстанавливать верхнее строение пути раздельно-конвейерным способом за счет укладки 25-метровых звеньев и повышает эффективность его использования в предложенной схеме организации восстановительных работ.

Кроме того, применение съемных колес позволит повысить основные показатели раздельно-конвейерного способа укладки пути при восстановлении железных дорог, например, в зоне проведения специальной военной операции.

Список источников

1. Низов А. С., Попов Д. И., Ложечников Г. А. Организация материально-технического обеспечения железнодорожных войск: учебное пособие. СПб.: ВАМТО, 2013. 359 с.

2. Сизов Е.Б. Организация технического прикрытия железных дорог: монография. СПб.: ВТУ ЖДВ, 2008. 238 с.

3. Мирошник А.А. Методика выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути при восстановлении железных дорог силами железнодорожных войск и структурных подразделений ОАО «РЖД» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2025. Т. 22. Вып. 2. С. 476–483.

4. Мирошник А. А., Черных А. К. Моделирование материально-технического обеспечения восстановления железных дорог: сборник статей III Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 2. Пермь: Пермский военный институт войск национальной гвардии, 2017. С. 58 – 65.

5. Черных А. К., Коричев А. А. Решение задачи выбора мест и способов заготовки материалов верхнего строения пути в среде ППП Mathcad // Научно-технический сборник, вып. 8. СПб.: ВТУ ЖДВ РФ, 2004. С. 248–261.

6. Мирошник А. А., Черных А.К. Программа распределения автомобильного транспорта при подвозе строительного-восстановительных материалов и конструкций для восстановления железнодорожных объектов № 2018615035: программа для ЭВМ. М.: ФИПС, 2018.

7. Черных А.К. Моделирование системы технического прикрытия железнодорожной сети в операциях: дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: Военная академия тыла и транспорта, 2010. 343 с.

8. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 1. М.: Мир, 1972. 335 с.

9. Даниленко А. И., Мирошник А. А., Даниленко П. Н. Устройство для транспортировки звена железнодорожного пути: полезная модель. М.: ФИПС, № 182916, 2018.

10. Даниленко А.И. Моделирование задачи рациональной организации и технологии работ по восстановлению верхнего строения железнодорожного пути // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 161.

Дата поступления: 22.01.2026

Решение о публикации: 13.03.2026

Контактная информация:

МИРОШНИК Александр Анатольевич — кандидат техн. наук, доцент; alexmiroschnik@mail.ru

ДАНИЛЕНКО Андрей Иванович — кандидат техн. наук, преподаватель; danilenko-ev1302f@mail.ru

The Use of a Special Device for Transporting Links During the Restoration of the Railway Track

A. A. Miroshnik¹, A. I. Danilenko²

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

²Military Logistics Academy of the Russian Federation, 8 Makarova emb., St. Petersburg, 199034, Russia

For citation: *A.A. Miroshnik, A.I. Danilenko. The Use of a Special Device for Transporting Links During the Restoration of the Railway Track // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 255–263. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-255-263 (In Russian)*

Abstract

Objective: to increase the efficiency of transportation of railway links, as well as to reduce the number of maintenance personnel during the restoration of railways. **Methods:** the research uses methods of analysis and comparative evaluation of alternative ways of laying the upper structure of the track. **Results:** proposals have been prepared to improve the separate conveyor method of laying railway tracks. **Practical significance:** a device for transporting railway track links can be recommended for use in the restoration of jelly roads, for example, in the area of a special military operation.

Keywords: the upper structure of the track, the restoration of railways, a separate conveyor method, a device for transporting a railway link, logistical support

References

1. Nizov A. S., Popov D. I., Lozhechnikov G. A. Organizatsiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya zheleznodorozhnykh vojsk: uchebnoe posobie [Organization of Logistical Support for Railway Troops: A textbook], Saint Petersburg, Military Academy of Logistics, 2013, 359 p. (In Russian)

2. Sizov E. B. Organizatsiya tekhnicheskogo prikrytiya zheleznykh dorog: monografiya [Organization of Technical Cover of Railways], Saint Petersburg, Military Institute (Railway Troops and Military Communications), 2008, 238 p. (In Russian)

3. Miroshnik A. A. Metodika vybora mest i sposobov zagotovki materialov verkhnego stroeniya puti pri vosstanovlenii zheleznykh dorog silami Zheleznodorozhnykh vojsk i strukturnykh podrazdelenij OAO "RZhD" [Methodology for Choosing Places and Methods of Harvesting Materials for the Upper Structure of the Track During the Restoration of Railways by the Forces of Railway Troops And Structural Divisions of JSC Russian Railways], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, Saint Petersburg, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 476–483. (In Russian)

4. Miroschnik A. A., Chernykh A. K. Modelirovanie material'no-tehnicheskogo obespecheniya vosstanovleniya zheleznykh dorog [Modeling of Material and Technical Support for the Restoration Of Railways], *Collection of Articles of the III International Scientific and Practical Conference: in 2 parts*, part 2, Perm Military Institute of the National Guard Troops, 2017, pp. 58–65. (In Russian)
5. Chernykh A. K., Korichev A. A. Reshenie zadachi vybora mest i sposobov zagotovki materialov verkhnego stroeniya puti v srede PPP Mathcad [Solving the Problem of Choosing Places and Methods of Harvesting Materials for the Upper Structure of the Path in the Environment of the Mathcad CHECKPOINT], *Scientific and Technical Collection*, vol. 8, Saint Petersburg, Military Transport University of the Railway Troops of the Russian Federation, 2004, pp. 248–261. (In Russian)
6. Miroschnik A. A., Chernykh A. K. Programma raspredeleniya avtomobil'nogo transporta pri podvoze stroitel'no-vosstanovitel'nykh materialov i konstruksij dlya vosstanovleniya zheleznodorozhnykh ob"ektov: programma dlya EVM [The Program of Distribution of Motor Transport for the Transportation of Construction and Restoration Materials and Structures for the Restoration of Railway Facilities: A Computer Program], Moscow, Federal Institute of Industrial Property of Russian Federation, 2018, no. 2018615035. (In Russian)
7. Chernykh A. K. Modelirovanie sistemy tekhnicheskogo prikrytiya zheleznodorozhnoj seti v operatsiyakh: dis. ... dokt. tekhn. nauk [Modeling of the System of Technical Cover of the Railway Network in Operations: dis. ... Dr. Sci. in Engineering], Saint Petersburg, Military Academy of Logistics and Transport, 2010, 343 p. (In Russian)
8. Vagner G. Osnovy issledovaniya operatsij [Fundamentals of Operations Research], vol. 1, Moscow, Mir Publishers, 1972, 335 p. (In Russian)
9. Danilenko A. I., Miroschnik A. A., Danilenko P. N. Ustrojstvo dlya transportirovki zvena zheleznodorozhnogo puti: poleznaya model' [A Device for Transporting a Link of a Railway Track: a Utility Model], Moscow, Federal Institute of Industrial Property of Russian Federation, 2018, no. 182916. (In Russian)
10. Danilenko A. I. Modelirovanie zadachi ratsional'noj organizatsii i tekhnologii rabot po vosstanovleniyu verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti [Modeling the Problem of Rational Organization and Technology of Work on the Restoration of the Upper Structure of the Railway Track], *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2016, no. 4 (43), p. 161. (In Russian)

Received: January 22, 2026

Accepted: March 13, 2026

Author's information:

Alexander A. MIROSHNIK — PhD in Engineering, Associate Professor; alexmiroschnik@mail.ru

Andrey I. DANILENKO — PhD in Engineering, Lecturer; www.danilenko-ev1302f@mail.ru

УДК 629.4.069

Разработка архитектуры единой цифровой платформы интеграции телематических данных автономных рефрижераторных вагонов с корпоративными системами ОАО «РЖД» на основе технологий промышленного интернета вещей и блокчейна

А.В. Шевченко

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», Россия, 127055, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Шевченко А. В. Разработка архитектуры единой цифровой платформы интеграции телематических данных автономных рефрижераторных вагонов с корпоративными системами ОАО «РЖД» на основе технологий промышленного интернета вещей и блокчейна // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 264–276. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-264-276

Аннотация

Статья посвящена решению актуальной проблемы фрагментации данных в процессе эксплуатации автономных рефрижераторных вагонов (АРВ) на сети железных дорог ОАО «РЖД». Ключевой задачей является разработка архитектуры единой цифровой платформы, автоматизация информационного поля, образуемого системами бортовой телематики (данные о температуре, местоположении, параметрах работы оборудования), его беспроводная интеграция с данными от корпоративных автоматизированных систем (АСУ) ОАО «РЖД» и объединение с внутренними системами оперативного, коммерческого и технического учета. **Цель:** разработка единой цифровой платформы АРВ, обеспечивающей формирование общего источника достоверных данных, сохранность грузов и безотказность оборудования АРВ. **Материалы и методы:** в работе использованы методы системного анализа для существующих решений в телематике рефрижераторного подвижного состава. Выявлены несовершенства информационного обмена между системами и проведена формализация требований к платформе. Принципы сервис-ориентированной архитектуры (СОА) использовались для проектирования архитектуры единой цифровой платформы АРВ. Концепции промышленного интернета вещей (IIoT) применялись для сбора данных от различных систем, а правила гибридного управления данными («единый слой данных» — Data Fabric) — для интеграции и обработки этих данных. **Результаты:** внедрение предложенной платформы позволит преодолеть проблемы разрозненности и запаздывания информации, оптимизировать логистические процессы, создать единый источник достоверных данных, реализовать переход к обслуживанию по фактическому состоянию и повысить безопасность движения поездов. **Практическая значимость:** информация от бортовых систем АРВ и от корпоративных АСУ ОАО «РЖД» поступает бессвязно, что требует ручного сопоставления данных и, как следствие, приводит к запаздыванию реакции на инциденты, что влечет порчу груза. Результаты работы позволят существенно увеличить эффективность использования рефрижераторного парка, обеспечить сохранность грузов, снизить операционные затраты и укрепят конкурентные позиции железнодорожного транспорта на рынке перевозок скоропортящихся продуктов.

Ключевые слова: автономный рефрижераторный вагон, телематика, интеграция данных, предиктивная аналитика

Введение

Перевозка скоропортящихся грузов железнодорожным транспортом представляет собой стратегически важный и технологически сложный сегмент логистики, обеспечивающий продовольственную безопасность и функционирование фармацевтической отрасли. Объем таких перевозок в России ежегодно составляет десятки миллионов тонн, а их стоимостное выражение исчисляется сотнями миллиардов рублей. В условиях глобализации рынков и ужесточения требований к качеству и безопасности продукции гарантия соблюдения заданного температурно-влажностного режима на протяжении всего логистического цикла трансформируется из конкурентного преимущества в обязательное условие перевозочного процесса [1, 2].

Согласно Правилам перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов, перевозчик обязан не только обеспечивать, но и документально подтверждать соблюдение температурного режима на всем пути следования [3]. Исторически эта задача решалась с помощью механических терморегистраторов, данные с которых считывались вручную каждые 500 км и по окончании рейса, что значительно увеличивало срок доставки груза даже при отсутствии отказов и их устранения.

Современные АРВ оборудуются бортовыми системами телематики, регистрирующими в реальном времени температуру в грузовом отсеке, параметры работы дизель-генераторной установки (ДГУ), уровень топлива, координаты посредством ГЛОНАСС/GPS, а также коды возникающих неисправностей [4]. Однако формируемый этими системами информационный поток зачастую существует в виде технологического «острова». Он не интегрирован с данными, генерируемыми и обрабатываемыми в корпоративных автоматизиро-

ванных системах учета (АСУ) ОАО «РЖД», такими как:

- Автоматизированная система «Электронная транспортная накладная» (АС «ЭТРАН») — ключевая система коммерческого учета, фиксирующая договорные отношения, маршрут, грузоотправителя и грузополучателя.
- Автоматизированная система учета и контроля выполненного ремонта и комплектации грузового вагона нового поколения (АС УКВ НП) — система технического учета, содержащая историю ремонтов, данные о комплектности и состоянии вагона.
- Единая комплексная система управления вагонным хозяйством (ЕК АСУВ) — система оперативного управления и планирования работы парка.

Этот «информационный разрыв» приводит к ряду критических проблем:

1. Ручной труд и ошибки. Диспетчеры, коммерсанты и технические специалисты вынуждены вручную сопоставлять данные из разных интерфейсов телематики и АСУ, что отнимает время и может являться источником ошибок.
2. Запаздывание реакции. Отсутствие автоматической привязки телеметрии к накладной делает невозможным мгновенное оповещение технического персонала о нарушении температурного режима. Реакция на инцидент происходит постфактум, когда груз уже может быть испорчен.
3. Сложность анализа. Невозможность проведения консолидированного анализа «больших данных» по всему парку для выявления закономерностей в отказах, оптимизации режимов работы и маршрутов.
4. Юридические риски. В спорных ситуациях с грузовладельцами данные телеметрии, хранящиеся у перевозчика, могут быть подвергнуты сомнению ввиду потенциальной возможности их изменения.

Таким образом, возникает острая необходимость в преодолении данной фрагментации через комплексную автоматизацию информационного поля и создание единого цифрового контура, обеспечивающего сквозной поток данных от датчиков на борту АРВ для всех заинтересованных сторон: диспетчеров, инженеров, грузовладельцев и систем бизнес-аналитики.

Преодолеть вышеуказанные проблемы возможно посредством разработки архитектурных и методологических решений для создания единой платформы автоматизации информационного поля телематики АРВ и его интеграции с АСУ ОАО «РЖД».

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести детальный анализ существующих систем телематики АРВ, корпоративных АСУ и выявить узкие места в обмене данными.

2. Сформулировать функциональные и технические требования к сквозному информационному потоку «борт — сервер — клиент» (где клиент — диспетчер, коммерсант, грузовладелец, система аналитики).

3. Спроектировать масштабируемую, отказоустойчивую архитектуру единой платформы сбора, обработки, обогащения и анализа данных.

4. Разработать математические модели и алгоритмы для ключевых сервисов платформы: предиктивного технического обслуживания (Predictive Maintenance) и логистической оптимизации.

5. Дать количественную оценку экономической, операционной и технологической эффективности внедрения предлагаемых решений.

Анализ существующих систем телематики АРВ и АСУ

Парк рефрижераторного подвижного состава характеризуется технологической неоднородностью, что обусловлено длительным

жизненным циклом вагонов и поэтапным внедрением новых систем мониторинга. Все решения можно условно классифицировать на три эволюционные группы (табл. 1).

Параллельно с телематикой существует контур автоматизированных систем учета (АСУ), который также не является единым. Данные о коммерческой операции (АС «ЭТРАН»), техническом состоянии (АС УКВ НП) и оперативном управлении (ЕК АСУВ) зачастую слабо связаны между собой и обновляются с разной цикличностью. Проблемы интеграции данных между этими двумя мирами — «физическим» (телематика) и «виртуальным» (учетные системы) — систематизированы в табл. 2.

Таким образом, создание надстройки в виде единой платформы автоматизации, выступающей «цифровым посредником» и «семантическим мостом» между бортовыми системами, инфраструктурой связи и АСУ, является необходимым эволюционным шагом.

Архитектура единой цифровой платформы автоматизации

Предлагаемая архитектура платформы, получившая условное название «Единый центр мониторинга АРВ» (ЕЦМ АРВ), представлена на рисунке. ЕЦМ АРВ строится на принципах сервис-ориентированной архитектуры (СОА), промышленного интернета вещей (IIoT) и концепции Data Fabric — единого слоя данных. Она представляет собой многоуровневую экосистему, обеспечивающую сквозной поток данных от сенсора до пользователя [8].

Буферный уровень сбора данных

Данный уровень обеспечивает взаимодействие с физическим миром. Его ключевая задача — надежный сбор данных в условиях нестабильной связи и технологического разнообразия. Этот уровень включает:

ТАБЛИЦА 1. Классификация и сравнительный анализ систем мониторинга АРВ

Группа систем	Технологические особенности	Преимущества	Недостатки	Примеры внедрения
Локальные регистраторы (Data Loggers)	Автономные устройства, записывающие температуру на внутреннюю память (флеш-накопитель). Данные считываются физически через интерфейс (USB) по прибытии вагона	Низкая стоимость; независимость от каналов связи; высокая точность	Полное отсутствие оперативности; риск потери/поломки носителя; высокие трудозатраты на сбор данных	Механические термографы, электронные логгеры «Термоконт», Testo
Системы спутниковой телематики с периодической передачей	Бортовой контроллер с GSM/GPRS- и ГЛОНАСС/GPS-модулями. Передает пакеты данных с заданным интервалом (от 30 с до нескольких часов) на сервер оператора	Периодический удаленный мониторинг; контроль местоположения	Зависимость от покрытия сотовых сетей; задержка данных; высокая стоимость трафика; отсутствие двусторонней связи	Системы «Транс-Телематика», «ГЛОНАСС-мониторинг» от различных вендоров (АО «НИАС», «М2М Телематика»)
Перспективные комплексы на основе IoT	Многосенсорные платформы с поддержкой двусторонней связи. Используют гибридные каналы (сотовая + спутниковая связь)	Высокая частота и оперативность данных; возможность удаленной диагностики и управления; сбор дополнительных параметров (влажность, CO ₂ , состояние дверей)	Высокая стоимость внедрения; сложность интеграции с другими бизнес-системами; требования к кибербезопасности	Пилотные проекты с использованием оборудования IQFreeze, ThermoFleet отечественной разработки [4, 5]

ТАБЛИЦА 2. Проблемы интеграции данных телематики АРВ и корпоративных АСУ

Категория проблем	Конкретные проявления	Последствия
Технологические	Разнородные протоколы передачи данных (CAN, Modbus, RS-485) и форматы сообщений от разных производителей бортового оборудования. Отсутствие единого отраслевого стандарта на телематический обмен для АРВ. Закрытые каналы передачи данных АСУ	Высокая стоимость разработки и поддержки множества адаптеров; технологическая зависимость от вендоров
Временные	Асинхронность потоков: телеметрия поступает непрерывно, а учетные события (погрузка, выгрузка, перевод в НПП/ПП) фиксируются дискретно. Задержки в передаче и обработке данных, особенно в районах со слабым покрытием связью	Невозможность построения точной картины «состояние груза — этап перевозки» в реальном времени; запаздывание реакции на инциденты
Семантические	Отсутствие автоматической привязки телеметрии к конкретной коммерческой накладной (ЭТРН). Разные системы идентификации одного и того же вагона в телематике и АСУ. Несогласованность справочников (номенклатура грузов, коды станций)	«Информационные разрывы»; необходимость ручного сопоставления; ошибки в аналитике

1. Бортовые устройства: контроллеры или RS-48, цифровые интерфейсы датчиков температуры/влажности). Критически важной является функция бортовой буферизации и интеллектуальной передачи: при потере канала

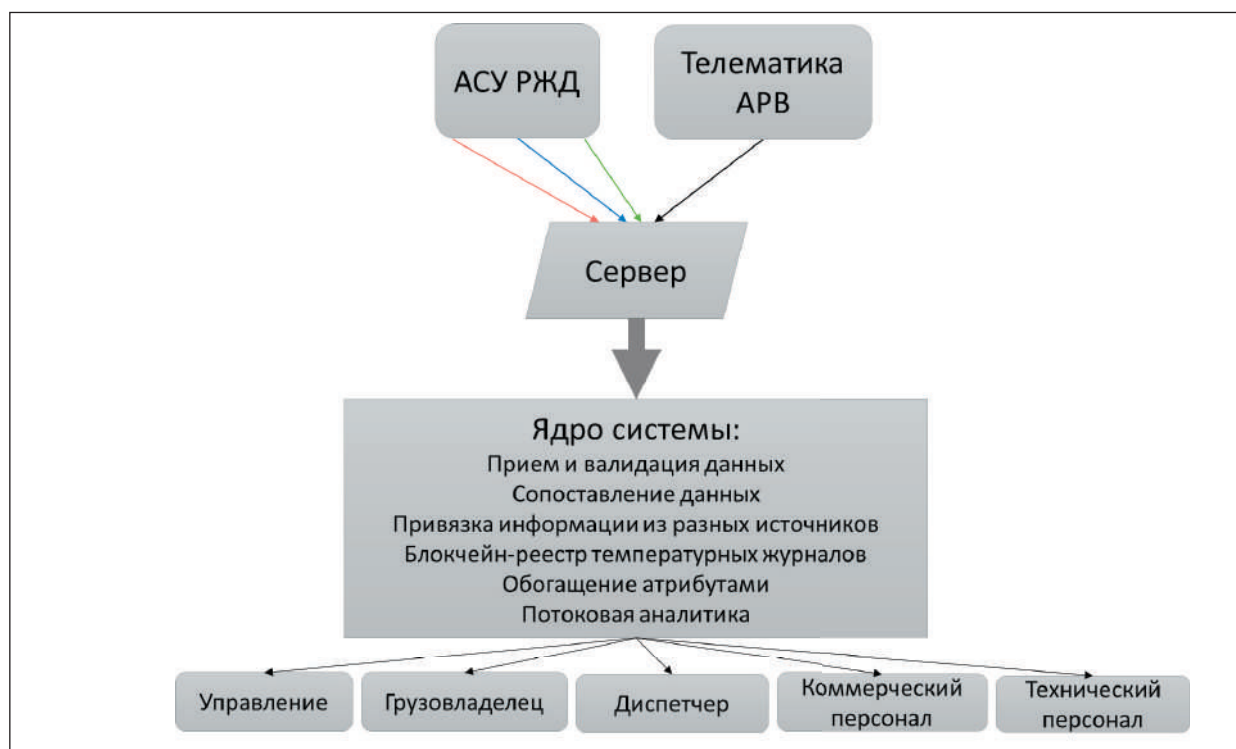


Рисунок. Архитектура платформы «Единый центр мониторинга АРВ»

данные сохраняются во внутренней памяти и передаются пачкой при восстановлении связи.

2. Гибридные каналы связи: для обеспечения покрытия на всей сети РЖД предлагается использовать многоабонентскую архитектуру:

- Основной канал: сотовая связь 4G/LTE (в перспективе 5G/NR) через российских операторов.

- Резервный канал: спутниковая связь (Iridium или отечественная система «Гонец») для критически важных сообщений и работы в удаленных регионах.

3. Шлюзы на инфраструктуре: установка приемных шлюзов на крупных станциях и в пунктах технического обслуживания для пакетной загрузки больших объемов данных при обработке поездов.

4. Протоколизация: внедрение открытого единого или адаптированного протокола обмена данными, что обеспечит обменом и исполь-

зованием информации две или более информационные системы / компоненты от разных производителей.

База для интеграции и обработки

Это ядро системы, развернутое в защищенном корпоративном облаке или дата-центре. Оно построено на базе микросервисов и выполняет следующие функции:

1. Прием и валидация: входящий поток данных проверяется на целостность, соответствие схеме и физическую правдоподобность (например, температура в грузовом отсеке не может быть $+100^{\circ}\text{C}$).

2. Блокчейн-реестр температурных журналов: это инновационный компонент, обеспечивающий доверие и неизменность данных. Каждое считанное значение температуры с метаданными (временная метка, координаты, номер вагона, хэш предыдущей записи)

формирует транзакцию, которая группируется в блоки и записывается в распределенный реестр. Для этого целесообразно использовать пермиссионный (разрешенный) блокчейн, где узлами-валидаторами выступают ОАО «РЖД», крупные грузоотправители и внешний регулятор. Полученный цифровой «паспорт поездки» криптографически защищен от изменений и может быть предоставлен любой заинтересованной стороне для аудита [6].

3. Сервис обогащения контекстом — решает ключевую задачу семантической привязки. На основе правил и алгоритмов он в реальном времени связывает поток телеметрии с данными из АСУ:

- Сопоставление вагона: по номеру вагона находится соответствующая запись в АСУ УКВ НП.

- Привязка к накладной: на основе временного интервала и данных о маршруте из АСУ «ЭТРАН» определяется активная электронная накладная, к которой относится текущая телеметрия.

- Обогащение атрибутами: к телеметрической записи добавляются данные о грузе (тип, допустимый температурный диапазон), грузоотправителе/грузополучателе, условиях договора.

4. Поточная аналитика: на базе технологий Apache Kafka Streams или Apache Flink анализируется обогащенный поток событий в реальном времени. Отслеживаются сложные события, например: *«температура вышла за верхний допустимый порог более чем на 4 °С и удерживается так дольше 15 минут»*. При обнаружении такого события запускаются автоматизированные сценарии [7].

Уровень бизнес-интеграции с АСУ

Обеспечивает двустороннюю синхронизацию с существующими системами учета через стандартизированные прокси-серверы, кото-

рые управляют входящими запросами, направляя их к нужным сервисам (API-шлюзы):

- Интеграция с АСУ «ЭТРАН»: платформа автоматически обновляет статус перевозки в накладной («Температурный режим в норме»/«Нарушение зафиксировано»). В обратную сторону при формировании новой накладной на АРВ в платформу передается информация о требуемом температурном режиме для данного груза.

- Интеграция с АСУ УКВ НП: передача данных о фактическом пробеге, моточасах работы ДГУ и холодильной установки для точного расчета межремонтных интервалов. Получение данных о плановых и выполненных ремонтах для корректировки предиктивных моделей [9].

- Интеграция с АСУ ЕК АСУВ: предоставление данных о текущем местоположении и технической готовности АРВ для оптимизации оперативного планирования подачи под погрузку.

- Интеграция с системой SAP ERP: передача данных о расходе топлива и других эксплуатационных затратах для расчета себестоимости перевозки и управления финансами.

Уровень аналитики, сервисов и представления

Это фронтальная часть платформы, представляющая ценность для конечных пользователей:

1. Предиктивные модели: на основе исторических данных, обогащенных контекстом, обучаются модели машинного обучения. Рекуррентные нейронные сети идеально подходят для анализа временных рядов телеметрии и прогнозирования остаточного ресурса компонентов (компрессора, дизельного генератора). А последовательность, создающая набор прогностических моделей, может использоваться для классификации типа потенциальной неисправности [11].

2. Сервис логистической оптимизации: используя данные о местоположении, состоянии оборудования, прогнозе погоды и графике движения, алгоритмы предлагают оптимальный порядок работы ХОУ для минимизации расхода топлива и соблюдения температурного режима [13].

3. Визуализация данных и порталы:

- оперативный диспетчерский портал: карта с реальным положением АРВ, «тепловая карта» нарушений, панели тревог;
- технический портал: детальная визуализация телеметрии по каждому вагону, прогнозы остаточного ресурса, рекомендации по ТО;
- клиентский портал (B2B): предоставление грузовладельцу защищенного доступа к температурному журналу своей партии груза в виде блокчейн-верифицируемого отчета, а также к прогнозу времени доставки.

4. Интерфейсы для внешних систем: открытые приложения, позволяющие интегрировать данные из ЕЦМ АРВ в системы клиентов, например, в финансовые или логистические и сторонние аналитические приложения.

Математическая модель и алгоритм предиктивного обслуживания холодильной установки

Сердцем системы предиктивного обслуживания является модель, оценивающая текущее техническое состояние агрегата и прогнозирующая момент наступления критического износа. Рассмотрим ее на примере ключевого узла — компрессора холодильной установки.

Формализация задачи

Пусть состояние компрессора в момент времени t описывается вектором контролируемых телеметрических параметров:

$$\vec{x}(t) = (T_H(t), T_B(t), P_M(t), I(t), V(t)), \quad (1)$$

где $T_H(t)$ — температура нагнетания;

$T_B(t)$ — температура всасывания;

$P_M(t)$ — давление масла в картере;

$I(t)$ — ток потребления электродвигателя;

$V(t)$ — уровень вибрации на корпусе.

При нормальной работе параметры $\vec{x}(t)$ колеблются вокруг некоторых номинальных значений, образуя многомерный временной ряд. Развитие дефекта (например, износ подшипников, утечка хладагента) приводит к изменению статистических свойств этого ряда и взаимосвязей между его компонентами.

Двухэтапный алгоритм детектирования аномалий и прогнозирования.

Этап 1. Обучение модели нормального поведения.

На историческом интервале данных, заведомо соответствующем нормальной работе оборудования АРВ, нейронная сеть обучается долговременным зависимостям. Ее задача — предсказывать значение вектора \vec{x} на следующем шаге ($t + 1$) по последовательности из n предыдущих значений [10]:

$$\hat{\vec{x}}(t + 1) = LSTM(\vec{x}(t - n), \dots, \vec{x}(t)). \quad (2)$$

На валидационном наборе оценивается точность модели и вычисляется базовая ошибка прогноза для нормального режима.

Этап 2. Оперативный мониторинг и вычисление интегрального показателя здоровья (Health Score).

Для каждого нового момента времени t модель выдает прогноз $\hat{\vec{x}}(t)$ и рассчитывается взвешенная среднеквадратичная ошибка — интегральный показатель отклонения от нормы $E(t)$:

$$E(t) = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (\hat{x}_j(t) - x_j^{fact}(t))^2}, \quad (3)$$

где $m = 5$ — число параметров;

$x_j^{fact}(t)$ — фактическое измеренное значение; w_j — весовой коэффициент, отражающий диагностическую значимость параметра ($\sum w_j = 1$). Веса могут определяться экспертно или на основе алгоритма случайного леса, обученного на данных с маркированными отказами.

Например: $w_{\text{вибрация}} = 0,35$, $w_{\text{ток}} = 0,25$, $w_{\text{давл.масла}} = 0,20$, $w_{\text{темп.нагн.}} = 0,15$, $w_{\text{темп.вс.}} = 0,05$.

Для сглаживания случайных выбросов рассматривается скользящее среднее ошибки за окно W :

$$\bar{E}(t) = \frac{1}{W} \sum_{i=t-W+1}^t E(i). \quad (4)$$

Этап 3. Принятие решения.

Динамика $\bar{E}(t)$ анализируется на предмет тренда (например, с помощью линейной регрессии). Пороговые значения устанавливаются статистически на основе исторических данных:

оповещение «Внимание»: $\bar{E}(t) > \mu_{\text{норм}} + 2\sigma_{\text{норм}}$. Рекомендуется усилить мониторинг; оповещение «Тревога»: $\bar{E}(t) > \mu_{\text{норм}} + 3\sigma_{\text{норм}}$. Планируется внеплановый осмотр при ближайшей технической возможности;

оповещение «Критический»: $\bar{E}(t) > \mu_{\text{норм}} + 5\sigma_{\text{норм}}$ или обнаружен резкий, монотонно возрастающий тренд. Требуется немедленный вывод вагона в ремонт.

Такой подход позволяет перейти от реагирования на абсолютные пределы параметров, которые часто превышаются уже при серьезной неисправности, к прогнозированию отказа на ранней стадии, по незаметным изменениям во взаимосвязях сигналов [12].

Оценка эффективности внедрения и пилотный проект

Внедрение платформы ЕЦМ АРВ — это масштабный инвестиционный проект. Его обоснование требует количественной оценки ожи-

даемого эффекта по технико-экономическим показателям, представленным в табл. 3.

Окупаемость проекта: суммарный годовой экономический эффект от прямых статей может составлять около 1 млрд руб. При предполагаемых капитальных затратах на разработку и внедрение платформы в 2–3 млрд руб. срок окупаемости составит 2–3 года.

Рекомендации по пилотному внедрению

Для минимизации рисков предлагается поэтапный подход.

Этап 1 (пилот, 6–9 мес.): развертывание платформы на 50–100 современных АРВ, задействованных на устойчивом маршруте (например, сообщение Север — Юг). Интеграция с АС «ЭТРАН». Отработка базовых сценариев мониторинга и оповещений.

Этап 2 (масштабирование, 1–1,5 года): расширение платформы на 1000 АРВ. Подключение интеграции с АС УКВ НП и ЕК АСУВ. Запуск предиктивных моделей на ограниченной группе вагонов.

Этап 3. (полное развертывание, 2 года): распространение платформы на весь парк АРВ, подключение всех АСУ, запуск системы блокчейн-реестра и клиентского портала [14].

Вопросы информационной безопасности и законодательного регулирования

Внедрение платформы сопряжено с серьезными требованиями по кибербезопасности, так как она становится критической информационной системой. Необходимо обеспечить:

- защиту периметра: межсетевой экран для глубокой фильтрации трафика и системы обнаружения вторжений;
- шифрование данных: сквозное шифрование при передаче от вагона до ЕЦМ АРВ; шифрование данных;

ТАБЛИЦА 3. Комплексная оценка эффективности внедрения платформы ЕЦМ АРВ

Категория эффекта	Ключевой показатель (KPI)	Базовый уровень (до внедрения)	Целевой уровень (после внедрения)	Расчетный годовой экономический эффект
Сохранность грузов и качество услуг	Доля перевозок с зафиксированными нарушениями темп. режима, ведущими к порче	По экспертной оценке: 0,5–1 % от стоимости перевозимых грузов	Снижение на 60–80 %	Прямое предотвращение убытков: 250–500 млн руб. (при объеме перевозок 50 млрд руб./год)
	Удовлетворенность клиентов (NPS)	Средний отраслевой уровень	Рост на 20–30 пунктов	Косвенный эффект от роста лояльности и объемов перевозок
Эффективность использования парка	Коэффициент груженого пробега АРВ	~0,55	Увеличение на 5–7 % (до 0,58–0,59)	За счет оптимизации логистики и сокращения простоев: ~300 млн руб.
	Среднее время оборота вагона	22–25 суток	Сокращение на 0,5–1 сутки	
Затраты на техническое обслуживание	Затраты на ТО и ремонт на 1 вагон-сутки	X руб.	Снижение на 15–20 %	Экономия на переходе от планово-предупредительного к предиктивному ТО: ~200 млн руб. (для парка в 5000 АРВ)
	Количество внеплановых отказов в пути	Y отказов/год	Снижение на 25–30 %	Снижение штрафов, простоев и затрат на аварийный ремонт
Операционная эффективность	Трудозатраты на сбор, сопоставление данных и формирование отчетов	Высокие, требуют труда нескольких сотен специалистов	Сокращение на 60–70 % за счет автоматизации	Высвобождение трудовых ресурсов, снижение ФОТ на ~150 млн руб.
Юридические и страховые риски	Количество спорных случаев с грузовладельцами	Десятки случаев в год	Снижение в разы	Сокращение судебных издержек; возможность снижения страховых тарифов на перевозку

- управление доступом: строгая аутентификация и авторизация, особенно для доступа к данным грузовладельцев;

- соответствие требованиям: ФЗ от 27.07.2006 № 152 «О персональных данных», ФЗ от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности КИИ», отраслевым стандартам РЖД.

Использование блокчейна для журналов температур должно получить юридическое признание. Требуется разработка и утверждение внутреннего стандарта ОАО «РЖД», а в перспективе – внесение изменений в нормативные акты Минтранса, признающих криптографически заверенные цифровые

журналы в качестве юридически значимого доказательства.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что фрагментация информационного поля между системами телематики АРВ и АСУ является ключевым технологическим барьером на пути цифровизации перевозок скоропортящихся грузов. Это приводит к прямым экономическим потерям, операционной неэффективности и снижению клиентоориентированности, а также к нарушению безопасности движения поездов.

Предложенная архитектура единой цифровой платформы ЕЦМ АРВ представляет собой комплексное решение, интегрирующее современные технологии: промышленный интернет вещей для сбора данных, облачные вычисления для их обработки, блокчейн для обеспечения доверия и неизменности критичных журналов, машинное обучение для предиктивной аналитики. Разработанная математическая модель на основе рекуррентных нейронных сетей и взвешенной ошибки прогноза позволяет перейти от обслуживания по фактическому отказу или жесткому графику к предиктивному обслуживанию по фактическому состоянию. Это коррелируется с тремя основными векторами развития отрасли: переходом на предиктивное обслуживание, внедрением блокчейна для идентификации и верификации, комплексной автоматизацией и роботизацией процессов (цифровой вагон).

Расчеты демонстрируют значительный экономический потенциал от внедрения: совокупный годовой эффект может достигать 1 млрд руб. при сроке окупаемости 2–3 года. Основные драйверы экономии — предотвращение порчи грузов, оптимизация использования парка, снижение затрат на ТО и высвобождение трудовых ресурсов от рутинных операций.

Перспективы дальнейших исследований:

1. Разработка детальных отраслевых стандартов на формат обмена телематическими данными для рефрижераторного подвижного состава.

2. Создание цифровых двойников АРВ, которые в реальном времени будут отражать не только телеметрию, но и все связанные бизнес-процессы [15].

3. Исследование применения технологий искусственного интеллекта для полностью автономной оптимизации логистических цепочек с участием АРВ.

4. Развитие клиентского портала в сторону полноценной платформы «логистика как услуга» с элементами смарт-контрактов на блокчейне.

Реализация данной концепции позволит владельцам АРВ не только решить текущие операционные проблемы, но и совершить качественный скачок, выведя услуги по перевозке скоропортящихся грузов на новый уровень надежности, прозрачности и экономической эффективности, что соответствует стратегическим целям цифровой трансформации транспортного комплекса России в целом.

Список источников

1. ГОСТ Р 58664-2019. Услуги на железнодорожном транспорте. Перевозка скоропортящихся грузов. Общие требования к качеству. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/72246/> (дата обращения: 01.12.2025).

2. The International Union of Railways. Best Practices for Perishable Goods Transport by Rail. 3rd ed. Paris, UIC Publications. 2022. 134 p.

3. Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов (утв. приказом Минтранса России от 04.03.2019 №66). URL: <https://base.garant.ru/72265752/> (дата обращения: 30.10.2025).

4. Шевченко А.В. Современные решения для автономных рефрижераторных вагонов модели 16-5213, обеспечивающие повышение их эксплуатационной надежности и работоспособности // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (70). С. 126–131. EDN AMPSPG

5. Ефанов Д.В., Смирнов А.А. Система мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе промышленного «Интернета вещей» // Мир транспорта. 2020. Т. 18, № 6. С. 118–134.

6. Лихова О.А., Кузьмина К.А., Жолондковский П.С. Технология блокчейн в логистике и управлении цепями поставок: описание применения и прогноз развития // Новое слово в науке: стратегии

развития: сборник материалов V Международной научно-практической конференции Чебоксары, 2018. С. 243–250.

7. Kafka: The Definitive Guide: Real-Time Data and Stream Processing at Scale / G. Shapira [et al.] USA: O'Reilly Media, 2021. Pp. 332–334.

8. Gartner Research. Innovation Insight: Data Fabric Architectures Are Key to Modern Data Management. 2023. URL: <https://www.gartner.com/en/documents/4018889> (дата обращения: 01.12.2025).

9. Предиктивная аналитика в железнодорожной логистике: матрица технологических решений и стратегия внедрения / Е. С. Гаврилюк, Т. Н. Бикмулина, Д. А. Попов, О. С. Хамдамов // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. № 3 (59). С. 99–104.

10. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, no. 8. Pp. 1735–1780.

11. Chen T., Guestrin C., Boost X.G. A Scalable Tree Boosting System // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'16)*. 2016. Pp. 785–794.

12. Качалов Д. Л., Мишустин А. В., Фархадов М. П. Современные методы обработки больших данных в крупномасштабных системах. Математические модели современных экономических процессов, методы анализа и синтеза экономических

механизмов // Актуальные проблемы и перспективы менеджмента организаций в России: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции (Самара, 24–28 апреля 2017 года). Вып. 11. Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. С. 65–71. EDN YMZHKD

13. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey / D. Kreutz [et al.] // *Proceedings of the IEEE*. 2015. Vol. 103, no. 1. Pp. 14–76.

14. Blockchain Technology in the Energy Sector: A Systematic Review of Challenges and Opportunities / M. Andoni [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 100. Pp. 143–174.

15. Шинкарук А. С., Куликов М. Ю., Барышников А. В. Совершенствование производственных и управленческих процессов при ремонте и техническом обслуживании пассажирских вагонов с использованием «цифровых двойников» // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 12 (36). С. 70–77. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-12-70-77. EDN ENMKIC

Дата поступления: 26.01.2026

Решение о публикации: 06.03.2026

Контактная информация:

ШЕВЧЕНКО Алексей Владимирович — аспирант; shevchenko@rusref.su

Development of the Architecture of a Unified Digital Platform for Integrating Telematics Data of Autonomous Refrigerated Wagons with Russian Railways Corporate Systems Based on Industrial Internet of Things and Blockchain Technologies

A. V. Shevchenko

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Russian University of Transport”, build. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127055, Russia

For citation: *Shevchenko A. V.* Development of the Architecture of a Unified Digital Platform for Integrating Telematics Data of Autonomous Refrigerated Wagons with Russian Railways Corporate Systems Based on Industrial Internet of Things and Blockchain Technologies // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 264–276. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-264-276 (In Russian)

Abstract

The article is devoted to solving the urgent problem of data fragmentation during the operation of autonomous refrigerated wagons (ARVs) on the Russian Railways railway network. The key task is to develop the architecture of a single digital platform, automate the information field generated by on-board telematics systems (data on temperature, location, equipment operation parameters), and seamlessly integrate it with data from corporate automated control systems JSC Russian Railways and integration with internal systems of operational, commercial and technical accounting. **Objective:** to develop a unified ARV digital platform that ensures the formation of a common source of reliable data, cargo safety and reliability of ARV equipment. **Materials and methods:** the paper uses system analysis methods for existing solutions in telematics of refrigerated rolling stock. The imperfections of the information exchange between the systems and the formalization of the platform requirements are revealed. The principles of service-oriented architecture (SOA) were used to design the architecture of a single digital ARB platform. The concepts of the Industrial Internet of Things (IIoT) were applied to collect data from various systems, and the rules of hybrid data management (“single data layer” – Data Fabric) were applied to integrate and process this data. **Results:** the implementation of the proposed platform will help overcome the problems of information fragmentation and delay, optimize logistics processes, create a single source of reliable data, implement the transition to maintenance based on the actual condition and improve train safety. **Practical significance:** information from on-board ARV systems and from corporate automated control systems of Russian Railways comes incoherently, which requires manual data comparison and, as a result, delayed response to incidents, which leads to damage to cargo. The results of the work will significantly increase the efficiency of using the refrigerated fleet, ensure the safety of goods, reduce operating costs and strengthen the competitive position of rail transport in the market of transportation of perishable products.

Keywords: autonomous refrigerated wagon, telematics, data integration, predictive analytics

References

1. GOST R 58664-2019. Uslugi na zheleznodorozhnom transporte. Perevozka skorporatyashchikhsya gruzov. Obshchie trebovaniya k kachestvu [Railway Transport Services. Transportation of Perishable Goods. General Quality Requirements], [cited: 12/01/2025]. Available at: <http://internet-law.ru/gosts/gost/72246>, accessed: January 12, 2026. (In Russian)
2. The International Union of Railways (UIC), Best Practices for Perishable Goods Transport by Rail, 3rd ed., Paris: UIC Publications, 2022, 134 p.
3. Pravila perevozok zheleznodorozhnym transportom skorporatyashchikhsya gruzov, utverzhennyye prikazom Mintransa Rossii ot 4 marta 2019 g. [Rules for the Transportation of Perishable Goods by Rail, approved by Order No. 66 of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated March 4, 2019]. Available at: <https://base.garant.ru/72265752/>, accessed: October 30, 2025. (In Russian)
4. Shevchenko A.V. Sovremennye resheniya dlya avtonomnykh refrizheratornykh vagonov modeli 16-5213, obespechivayushchie povyshenie ikh ekspluatatsionnoj nadyozhnosti i rabotosposobnosti [Modern Solutions for Autonomous Refrigerated Wagons of the 16-5213 Model, Ensuring an Increase in Their Operational Reliability and Operability], *Proceedings of the Rostov State University of Railway Transport*, 2025, no. 1 (70), pp. 126–131. Available at: <http://www.elibrary.ru/item.asp?id=82266992>, accessed: January 30, 2025. EDN AMPSPG (In Russian)
5. Efanov D. V., Smirnov A. A. Sistema monitoringa ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki na osnove promyshlennogo «Interneta veshchej» [Monitoring System of Railway Automation Devices Based on the Industrial “Internet of Things”], *Mir transporta [The World of Transport]*, 2020, vol. 18, no. 6, pp. 118–134. (In Russian)
6. Likhova O.A., Kuzmina K.A., Zholondkovsky P.S. Tekhnologiya blokchejn v logistike i upravlenii

tsepyami postavok: opisanie primeneniya i prognoz razvitiya [Blockchain Technology in Logistics and Supply Chain Management: Application Description and Development Forecast], *Novoe slovo v nauke: strategii razvitiya: sb. mat-lov V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Cheboksary [A New Word in Science: Development Strategies, Collection of Materials of the V International Scientific and Practical Conference]*, Cheboksary, 2018, pp. 243–250. (In Russian)

7. Shapira G., et al. *Kafka: The Definitive Guide: Real-Time Data and Stream Processing at Scale*, USA, O'Reilly Media, 2021, pp. 332–334.

8. Gartner Research. Innovation Insight: Data Fabric Architectures are Key to Modern Data Management. 2023. Available at: <https://www.gartner.com/en/documents/4018889>, accessed: January 12, 2025.

9. Gavriljuk E.S., et al. Prediktivnaya analitika v zheleznodorozhnoj logistike: matritsa tekhnologicheskikh reshenij i strategiya vnedreniya [Predictive Analytics in Railway Logistics: A Matrix of Technological Solutions and an Implementation Strategy], *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya [Natural sciences and humanities research]*, 2025, no. 3 (59), pp. 99–104. (In Russian)

10. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory, *Neural Computation*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780.

11. Chen T., Guestrin C. Boost X. G. A Scalable Tree Boosting System, *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*, 2016, pp. 785–794.

12. Kachalov D. L., Mishustin A. V., Farkhadov M. P. Sovremennye metody obrabotki bol'shikh dannykh v krupnomasshtabnykh sistemakh. Matematicheskie modeli sovremennykh ekonomicheskikh protsessov, metody analiza i sinteza ekonomicheskikh mekhanizmov [Modern Methods of Big Data Processing

in Large-Scale Systems. Mathematical Models of Modern Economic Processes, Methods of Analysis and Synthesis of Economic Mechanisms], *Current Problems and Prospects of Management of Organizations in Russia. Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference, Samara, April 24–28, 2017*, iss. 11, *Samarskij nauchnyj tsentr RAN [Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 2017, pp. 65–71. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32342348>, accessed: April 12, 2025. EDN YMZHKD (In Russian)

13. Kreutz D., et al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey, *Proceedings of the IEEE*, 2015, vol. 103, no. 1, pp. 14–76.

14. Andoni M., et al. Blockchain Technology in the Energy Sector: A Systematic Review of Challenges and Opportunities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 100, pp. 143–174.

15. Shinkaruk A. S., Kulikov M. Yu., Baryshnikov A. V. Sovershenstvovanie proizvodstvennykh i upravlencheskikh protsessov pri remonte i tekhnicheskome obsluzhivanii passazhirsikh vagonov s ispol'zovaniem "tsifrovyykh dvoynikov" [Improvement of Production and Management Processes in the Repair and Maintenance of Passenger Cars Using "Digital Twins"], *Transportnoe mashinostroenie [Transport engineering]*, 2024, no. 12 (36), pp. 70–77. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75251252>, accessed: January 12, 2025. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-12-70-77. EDN ENMKIC (In Russian)

Received: January 26, 2026

Accepted: March 06, 2026

Author's information:

Alexey V. SHEVCHENKO — Postgraduate Student; shevchenko@rusref.su

УДК 621.313.333

Расчет паразитных емкостей асинхронного тягового электродвигателя, управляемого преобразователем частоты

А. В. Карманов

ООО «Уральские локомотивы», региональный центр, Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, участок ж/д Река Славянка — ЛЭП

Для цитирования: Карманов А. В. Расчет паразитных емкостей асинхронного тягового электродвигателя, управляемого преобразователем частоты // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 277–287. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-277-287

Аннотация

Цель: теоретический расчет паразитных емкостей асинхронного электродвигателя, управляемого преобразователем частоты, для создания имитационной модели. **Методы:** применение законов электротехники для расчета емкости плоского и цилиндрического конденсаторов и конструктивных характеристик асинхронного электродвигателя к расчету идеальных эквивалентов паразитных емкостей асинхронного электродвигателя. **Результаты:** предложена эквивалентная емкостная схема асинхронного электродвигателя, выполнены выделение паразитных емкостей асинхронного электродвигателя, замена их на идеальные эквиваленты. Предложены методы расчета идеальных эквивалентов паразитных емкостей тягового асинхронного электродвигателя, а также упрощенный метод оценки емкости шарикового радиального подшипника на основе оценки контактной площади зоны Герца. Выполнено сравнение данных, полученных теоретическим путем, с данными, полученными в результате проведенных измерений, и данными, приведенными в различных источниках. Предложенные методы отличаются простотой расчетов и имеют удовлетворительную точность. **Практическая значимость:** полученные в результате теоретического расчета данные используются в эквивалентной схеме асинхронного электродвигателя при создании модели тягового привода в среде имитационного моделирования Simulink для оценки величины приложенного к подшипнику напряжения и протекающего через него тока, определения потенциального пути протекания высокочастотного тока через подшипники тягового асинхронного электродвигателя с целью разработки дальнейших мер по снижению их влияния и повышению надежности подшипникового узла тягового асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, синфазное напряжение, эквивалентная схема, паразитная емкость, подшипник, подшипниковый ток

Введение

Тяговый электродвигатель электропоезда является трехфазным асинхронным электродвигателем, который питается от инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), конструктивно состоящего из шести ключевых элементов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Каждый полумост, состоящий из двух IGBT,

формирует на выходе напряжение заданной частоты и амплитуды. Три полумоста позволяют создать трехфазную систему переменного напряжения для питания тягового электродвигателя. Действующее значение выходного напряжения регулируется посредством изменения ширины импульса выходного напряжения. Длительность импульсов выбирается таким образом, чтобы обеспечить форму тока

нагрузки, наиболее приближенной к синусоидальной, и обеспечить минимальные потери в инверторе напряжения.

Основные гармоники хоть и являются симметричными и сбалансированными, но при широтно-импульсной модуляции невозможно сделать сумму трех напряжений, в каждый момент времени равной нулю [1]. В таком случае напряжение в нейтральной точке «звезды» не равно нулю. Согласно [2], это напряжение — напряжение источника синфазной помехи (U_{CM} — *common mode voltage*). Синфазное напряжение U_{CM} характеризуется высокими скоростями нарастания dU/dt и равно среднему арифметическому напряжению трех фаз к земле [3]:

$$U_{CM} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}, \quad (1)$$

где U_A, U_B, U_C — фазные напряжения.

Приложенное на клеммах двигателя высокочастотное синфазное напряжение вследствие емкостных связей между компонентами асинхронного электродвигателя вызывает протекание синфазного тока.

Синфазный ток поступает в двигатель от инвертора и в наилучшем варианте через систему защитного заземления возвращается обратно на инвертор. Но часть синфазного тока протекает через подшипники электродвигателя, что приводит к их преждевременному отказу.

Эквивалентная емкостная схема асинхронного электродвигателя

Для упрощения понимания природы подшипниковых токов и дальнейшего имитационного моделирования тяговый электродвигатель можно представить в виде эквивалентной схемы [4] (рис. 1), в которой все распределенные паразитные емкости заменены на их идеальные эквиваленты.

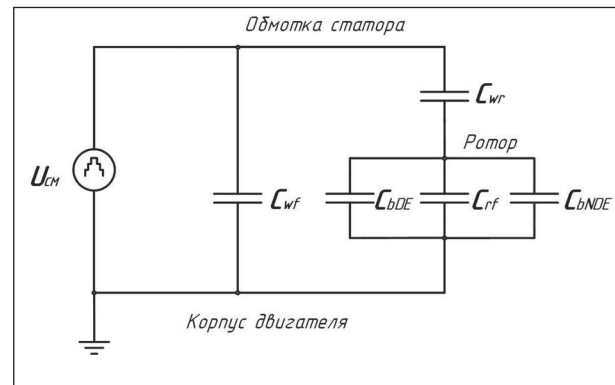


Рис. 1. Эквивалентная емкостная схема асинхронного электродвигателя, где C_{wf} (*winding-frame capacitor*) — емкость, образованная статорной обмоткой и сердечником статора;

C_{wr} (*winding-rotor capacitor*) — емкость, образованная статорной обмоткой и ротором;

C_{rf} (*rotor frame capacitor*) — емкость, образованная ротором и сердечником статора;

C_{bDE} — емкость, образованная подшипником с приводной стороны (*drive end*);

C_{bNDE} — емкость, образованная подшипником с неприводной стороны (*none-drive end*)

Расчет паразитных емкостей асинхронного электродвигателя

Паразитные емкости асинхронного электродвигателя показаны на рис. 2.

Емкость, образованная статорной обмоткой и сердечником статора C_{wf} (*winding-frame capacitor*), для упрощения может быть представлена в виде n_s плоских конденсаторов [5] и рассчитана:

$$C_{wf} = n_s \frac{\epsilon_0 \epsilon S_s}{d_{iso}}, \quad (2)$$

где n_s — количество пазов сердечника статора;

ϵ_0 — электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

ϵ — диэлектрическая проницаемость изоляции статорной обмотки;

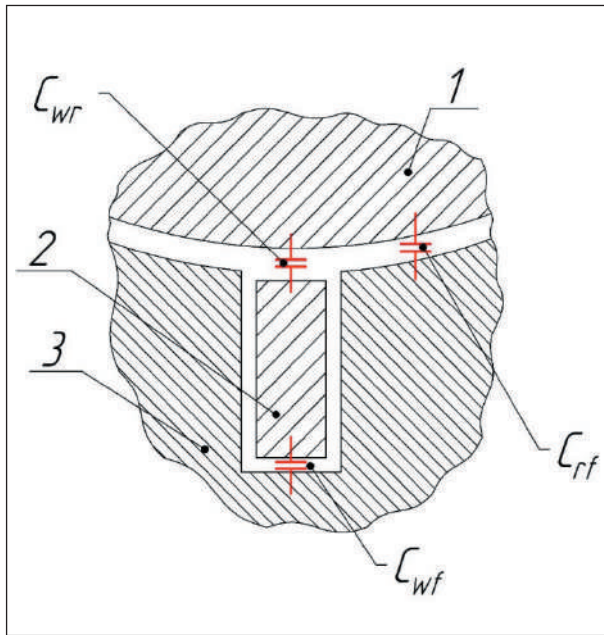


Рис. 2. Паразитные емкости асинхронного электродвигателя: 1 — ротор; 2 — обмотка статора; 3 — сердечник статора (пакет активной стали)

S_s — общая площадь поверхности паза сердечника статора, м²;

d_{iso} — толщина слоя изоляции катушки статорной обмотки, м.

При применении паза прямоугольной формы его площадь вычисляется:

$$S_s = (2h + b)l, \tag{3}$$

где b — ширина паза, м;

h — глубина паза, м;

l — длина паза, м.

Емкость, образованная ротором и сердечником статора C_{rf} , зависит от геометрических параметров воздушного зазора. Эту емкость можно представить в виде цилиндрического конденсатора [6], емкость которого может быть рассчитана:

$$C_{rf} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{d_s}{d_r}}, \tag{4}$$

где l — длина статорного пакета, м;

d_r — диаметр ротора, м;

d_s — диаметр расточки статора, м.

Но так как воздушный промежуток δ много меньше, чем наружный диаметр ротора [7], натуральный логарифм отношения диаметра расточки статора к диаметру ротора может быть примерно определен:

$$\ln \frac{d_s}{d_r} \approx \frac{2\delta}{d_r}. \tag{5}$$

После линеаризации и введения коэффициента Картера k_c [8] получаем приближенное уравнение:

$$C_{rf} = \epsilon_0 l \frac{\pi d_r}{k_c \delta}, \tag{6}$$

где δ — ширина воздушного зазора, м.

Коэффициент Картера определяется отношением максимальной магнитной индукции в зазоре к средней и рассчитывается на основе геометрии зубцовой зоны [9]:

$$k_c = \frac{B_{\delta max}}{B_{\delta cp}} = \frac{\tau_n}{\tau_n - \gamma b_s}, \tag{7}$$

где τ_n — распределение пазов статора, $\tau_n = \frac{\pi d_s}{n_s}$;

γ — вспомогательный коэффициент, $\gamma = \frac{\frac{b_s}{\delta}}{\frac{b_s}{\delta} + 5}$;

b_s — ширина зубца сердечника статора, м.

Емкость между статорной обмоткой и ротором C_{wr} образуется вследствие взаимодействия обмоток статора в пазах и поверхностью ротора. Величина емкости C_{wr} относительно мала в сравнении с другими паразитными емкостями электродвигателя из-за относительно большого расстояния и небольшой площади между обмоткой статора и ротором. Моделирование емкости C_{wr} осуществляется в виде n_s плоских конденсаторов, каждый из которых состоит из последовательного соединения емкости C_{wr0} , образованной воздушным промежутком

и верхней границей пазового клина, и емкости C_{wr1} , образованной пазовым клином и проводником статорной обмотки [10]. Емкости рассчитываются:

$$C_{wr0} = n_s \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a b_0 l}{h_0 + \delta}, \quad (8)$$

где ε_a — диэлектрическая проницаемость воздуха;

b_0 — ширина паза, м;

h_0 — высота шлица паза, м.

$$C_{wr1} = n_s \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{iso} b_0 l}{h_{iso}}, \quad (9)$$

где ε_{iso} — диэлектрическая проницаемость пазового клина;

h_{iso} — толщина пазового клина и изоляции обмотки, м.

Общая емкость двух последовательно соединенных конденсаторов вычисляется:

$$C_{wr} = \frac{1}{\frac{1}{C_{wr0}} + \frac{1}{C_{wr1}}}. \quad (10)$$

При вращении подшипника на скорости, достаточной для образования электрической изолирующей пленки смазочного материала, и если приложенное напряжение не превышает пороговое напряжение пробоя, то подшипник можно представить в виде конденсатора. Расчет его емкости вызывает значительные затруднения вследствие сложности геометрической структуры подшипника. Учитывая это, используется упрощенный метод, в котором для расчета применяется минимальная толщина пленки смазочного материала h_0 и контактная площадь области Герца A_H , которая определяется пластической деформацией шариков в подшипниках качения под воздействием механического давления в реальных условиях эксплуатации. На основании [11] площадь между телом и поверхностью качения условно

можно разделить на три зоны: зону входа, контактную зону Герца и зону выхода. Каждую из этих зон можно представить в виде определенной емкости, что показано на рис. 3. Общая емкость тела качения в контактной зоне состоит из трех параллельных емкостей [12] и равна:

$$C_{b1} = C_E + C_H + C_O, \quad (11)$$

где C_E — емкость зоны входа;

C_H — емкость контактной зоны Герца;

C_O — емкость зоны выхода.

Так как емкости зоны входа и зоны выхода зависят от геометрических параметров подшипника, то, как указано в [13], для расчета вводится поправочный коэффициент k_0 . В [14] принято универсальное значение поправочного коэффициента $k_0 = 3,5$. И далее расчет емкости ведется как для плоского конденсатора с учетом этого коэффициента:

$$C_{b1} = k_0 C_H = k_0 \times \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A_H}{h_0}, \quad (12)$$

где A_H — контактная площадь зоны Герца, м²;

h_0 — толщина пленки смазочного материала, м.

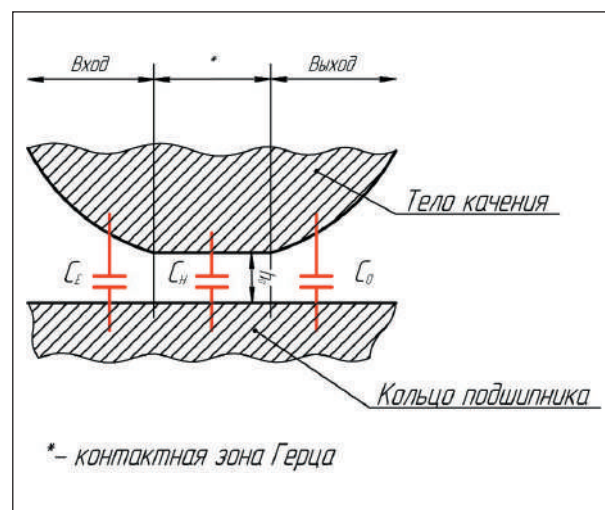


Рис. 3. Емкости в контактной зоне между телом и поверхностью качения подшипника

Согласно [15], контактная площадь зоны Герца вычисляется:

$$A_H = \pi ab, \quad (13)$$

где a и b — полуоси эллипса контакта.

Как сказано в [16], радиус пятна контакта шара с плоскостью определяется как:

$$a = 1,11 \left(\frac{FR}{E} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (14)$$

где R — радиус шарика, м;

E — модуль упругости стали, Па;

F — нагрузка на шарик, Н.

Для упрощенной оценки контактной площади зоны Герца допускаям, что $a \approx b$, тогда:

$$A_H \approx 3,8 \left(\frac{FR}{E} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (15)$$

При данной оценке площади зоны Герца применяется ряд допущений:

- $R_1 \approx R_2$, где R_1 — радиус шарика, R_2 — эквивалентный радиус кривизны дорожки качения в точке контакта;
- $E_1 = E_2$, где E_1 и E_2 — модули упругости материала шарика и кольца;
- $\nu_1 = \nu_2$, где ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона материалов шарика и кольца.

Внутренняя и внешняя поверхности качения и шарик образуют две последовательно соединенные емкости C_{b1} и C_{b2} [17] (рис. 4)

Для расчета предполагаем, что две емкости C_{b1} и C_{b2} одинаковы, поэтому, согласно определению емкости для последовательного соединения конденсаторов, емкость, образованная шариком:

$$\frac{1}{C_b} = \frac{1}{C_{b1}} + \frac{1}{C_{b2}}. \quad (16)$$

$$C_b = 0,5C_{b1}. \quad (17)$$

Емкость подшипника в целом представляется параллельными емкостями, образованными шариками. Для расчета принимается, что

все эти емкости одинаковы. Поэтому, согласно определению емкости, при параллельном соединении конденсаторов:

$$C_B = \sum_{n=1}^{N_b} C_b. \quad (18)$$

Предложенный метод основывается на оценке контактной зоны Герца эллипсоидной, близкой к окружности формы. Поэтому он может быть применен для упрощенного расчета емкости только шарикового подшипника.

Пример расчета идеальных эквивалентов паразитных емкостей

В качестве примера для оценки адекватности метода теоретического расчета идеальных эквивалентов паразитных емкостей,

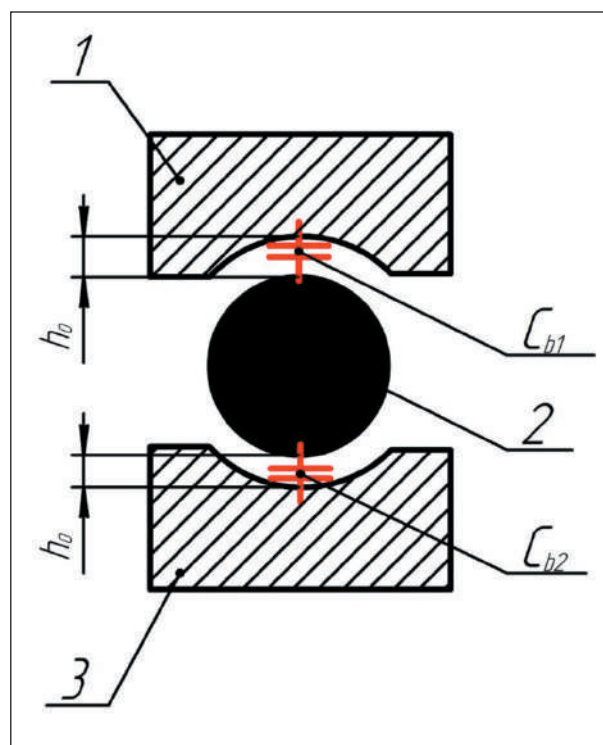


Рис. 4. Схематическое изображение двух конденсаторов, которые образованы шариком в подшипнике: 1, 3 — наружное и внутреннее кольца; 2 — шарик

основывающегося на законах электротехники и конструктивных характеристиках асинхронного электродвигателя, произведем расчет данных емкостей для тягового асинхронного электродвигателя 1ТВ2216-0GC03.

1. Расчет емкости, образованной обмоткой статора и сердечником статора.

Для расчета используются следующие исходные данные:

- количество пазов сердечника статора — 72;
- длина сердечника — 250 мм;
- ширина паза — 10,8 мм;
- глубина паза — 42 мм;
- изоляция обмотки — полиамидная, относительная диэлектрическая проницаемость находится в пределах 3,6...4,0, для расчетов принята $\epsilon = 3,8$;
- толщина изоляционного слоя — 1,5 мм.

$$C_{wf} = 72 \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,8 \cdot 0,0237}{0,0015} = 38,2575 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

2. Расчет емкости, образованной ротором и сердечником статора.

Для расчета используются следующие исходные данные:

- диаметр ротора — 346,4 мм;
- диаметр расточки статора — 350 мм;
- ширина воздушного зазора — 1,8 мм;
- ширина зубца сердечника статора — 6,5 мм.

$$\tau_n = \frac{\pi \cdot 350 \cdot 10^{-3}}{72} = 0,01527;$$

$$\gamma = \frac{\frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-3}}}{\frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-3}} + 5} = 0,4194;$$

$$k_c = \frac{0,0153}{0,0153 - 0,4194 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}} = 1,22;$$

$$C_{rf} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,25 \cdot \frac{\pi \cdot 0,346}{1,22 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}} = 1,10 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

3. Расчет емкости, образованной обмоткой статора и ротором.

Для расчета используются следующие исходные данные:

- ширина паза сердечника статора — 10,8 мм;
- высота шлица паза — 1 мм;
- материал пазового клина — стеклотекстолит, относительная диэлектрическая проницаемость находится в пределах 5,7...6,15, для расчетов принята $\epsilon_{iso} = 6,0$;
- толщина пазового клина и изоляции обмотки — 2,5 мм.

$$C_{wr0} = 72 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,250}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}} = 0,614 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

$$C_{wr1} = 72 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,250}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 4,13 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

$$C_{wr} = \frac{1}{\frac{1}{0,614 \cdot 10^{-9}} + \frac{1}{4,13 \cdot 10^{-9}}} = 0,535 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

4. Расчет емкости подшипника.

Для расчета используются следующие данные:

- диаметр шариков — 13,4940 мм;
- материал колец и шариков — хромистая сталь марки 100Cr6 (аналог в РФ — сталь ШХ15), модули упругости для хромистой стали марки ШХ15, $E = 210 \text{ ГПа}$;
- радиальная нагрузка — 4941 Н;
- минимальный радиальный люфт подшипника равен 0,085 мм, максимальный радиальный люфт равен 0,105 мм, поэтому толщину смазочной пленки для расчета примем $h_0 = 0,005 \text{ мм}$;

- смазка подшипника — Mobil Mobilith SHC 100, диэлектрическая проницаемость находится в пределах 2,4...2,8, для расчета принимается $\varepsilon = 2,8$;

- токоизолирующий слой выполнен из оксида алюминия, диэлектрическая проницаемость находится в пределах 9...10, для расчета принимается $\varepsilon = 10$.

$$A_H \approx 3,8 \cdot \left(\frac{4941 \cdot 6,747 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot 10^9} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,1141 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$C_{b1} = 3,5 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12,8 \cdot 1,1141 \cdot 10^{-6}}{0,005 \cdot 10^{-3}} = 88,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$C_b = 0,5 \cdot 88,3 \cdot 10^{-12} = 44,2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$C_B = \sum_{n=1}^{14} 44,2 \cdot 10^{-12} = 618 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Заключение

Тяговый привод с использованием асинхронного тягового электродвигателя, управляемого тяговым преобразователем частоты, обладает бесспорными преимуществами перед тяговым приводом с коллекторными электродвигателями, но и имеет ряд недостатков. Одним из них является возникновение высокочастотных токов, протекающих через подшипники тягового электродвигателя и приводящих к их ускоренному износу.

Для разработки мер по снижению влияния подшипниковых токов необходимо предусмотреть потенциальные пути таких токов. Чтобы разработать имитационную модель для исследования подшипниковых токов, тяговый электродвигатель заменяется эквивалентной емкостной схемой. Все распределенные паразитные емкости заменяются идеальными эквивалентами. В ходе выполнения работы выделе-

ны паразитные емкости, предложены методы теоретического расчета их величин. При расчете емкости, образованной обмоткой статора и пакетом активной стали тягового электродвигателя 1ТВ2216-0GC03, получено значение $C_{wf} = 38,2575$ нФ, при измерении данной емкости измерителем параметров RLC получено значение $C_{wf} = 35,670$ нФ.

Измерения емкостей, образованных ротором и статорной обмоткой, а также ротором и сердечником статора, будут недостоверными из-за наличия параллельных емкостей, образованных подшипниками с приводной и неприводной стороны. Погрешность в эти измерения вносят подшипниковый щит с неприводной стороны, вентиляционная решетка с напрессованной полумуфтой со стороны привода, а также наличие лабиринтных колец подшипников. В [6] для электродвигателя мощностью 500 кВт приводятся данные $C_{rf} = 1,375$ нФ и $C_{wf} = 0,137$ нФ. При теоретическом расчете получены $C_{rf} = 1,10$ нФ и $C_{wf} = 0,535$ нФ. В [18] для однорядного радиального шарикового подшипника типа 6316 указана емкость $C_b = 159$ пФ, в работе при расчете емкости подшипника типа 6016 получено значение емкости $C_b = 618$ пФ.

Теоретический расчет емкости подшипника будет приближен из-за погрешности при определении контактной площади зоны Герца, использования универсального значения поправочного коэффициента и вероятного определения толщины смазочной пленки. Но исходя из сравнений результатов, полученных в результате измерений, можно судить об адекватности метода теоретического расчета паразитных емкостей и использовании полученных значений при создании имитационной модели с целью дальнейшей разработки мер по снижению влияния высокочастотного тока на работу подшипникового узла тягового асинхронного электродвигателя.

Список источников

1. Singh H., Sudhoff S. D. A Common-Mode Shorting Network to Reduce Common-Mode Excitation of Three-Phase Two-Level Electric Drives // *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2023. Vol. 10. Pp. 14–24. URL: https://www.academia.edu/103826562/A_Common_Mode_Shorting_Network_to_Reduce_Common_Mode_Excitation_of_Three_Phase_Two_Level_Electric_Drives (дата обращения: 12.12.2025).
2. ГОСТ Р 55136-2017/IEC/TS60034-25:2007. Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Руководство по конструкции и характеристикам машин переменного тока, специально предназначенных для питания от преобразователей // *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103686> (дата обращения: 12.12.2025).
3. An Impedance Source Multi-Level Three Phase Inverter with Common Mode Voltage Elimination and Dead Time Compensation / M. Mahmoudian [et al.] // *Electronics*. 2020. No. 9. Pp. 1639–1655. URL: https://www.researchgate.net/publication/344582701_An_Impedance_Source_Multi-Level_Three_Phase_Inverter_with_Common_Mode_Voltage_Elimination_and_Dead_Time_Compensation (дата обращения: 15.12.2025).
4. Adabi J., Zare F. Analysis, Calculation and Reduction of Shaft Voltage in Induction Generators // *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality*, 15–17 April. 2009. Valencia. URL: <https://eprints.qut.edu.au/20191/1/20191.pdf> (дата обращения: 15.12.2025).
5. A Review of Modeling and Mitigation Techniques for Bearing Currents in Electrical Machines with Variable-Frequency Drives / W. Zhu [et al.] // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 125279–125297. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9964144> (дата обращения: 20.12.2025).
6. Muetze A., Binder A. Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Drive Systems // *IEEE Transactions on Industry Applications*, May/June 2007. Vol. 43, no.3. Pp. 665–672. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4215013> (дата обращения: 25.12.2025).
7. Normalization-Based Approach to Electric Motor BVR Related Capacitances Computation / J. Ahola [et al.] // *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. San Antonio, TX, USA. 2018. Pp. 2868–2874. URL: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159886/ahola_et_al_normalization-based_approach_final_draft.pdf (дата обращения: 25.12.2025).
8. Binder A., Muetze A. Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines. // *IEEE Transactions on Industry Applications*, May/June 2008. Vol. 44, no.3. Pp. 769–776. URL: https://www.researchgate.net/publication/3175055_Scaling_Effects_of_Inverter-Induced_Bearing_Currents_in_AC_Machines (дата обращения: 27.12.2025).
9. Тулупов В.Д., Слепцов М.А., Бридис А.А. Методы повышения надежности работы подшипниковых узлов в тяговых асинхронных машинах // *Вестник МЭИ*. 2021. №2. С. 60–70. URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/695> (дата обращения: 04.01.2026).
10. Tawfiq K. B., Güleç M., Sergeant P. Bearing Current and Shaft Voltage in Electrical Machines: A Comprehensive Research Review // *Machines*. 2023. No. 11. 550 p. URL: https://www.academia.edu/106269225/Bearing_Current_and_Shaft_Voltage_in_Electrical_Machines_A_Comprehensive_Research_Review (дата обращения: 04.01.2026).
11. Modeling of Bearing Voltage in Electric Machines Based on Electromagnetic FEA and Measured Bearing Capacitance / P. Han [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*, Sept./Oct. 2021. Vol. 57, no. 5. Pp. 4765–4775. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9465698> (дата обращения: 05.01.2026).
12. Furtmann A., Gerhard P. Evaluation of Oil-Film Thickness Along the Path of Contact in a Gear Mesh by Capacitance Measurement // *Tribology Online*. 2016. No. 11. Pp. 189–194. URL: <https://www.researchgate.net/publication/3175055>

net/publication/301746461_Evaluation_of_Oil-Film_Thickness_Along_the_Path_of_Contact_in_a_Gear_Mesh_by_Capacitance_Measurement (дата обращения: 06.01.2026).

13. Becker-Dombrowsky F.M., Kirchner E. Electrical Impedance Based Condition Monitoring of Machine Elements — A Systematic Review // *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 10.

14. Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano- and Macro-Range / V. Schneider [et al.] // *Lubricants*. 2022. No.10. 194 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/362838744_Electrical_Bearing_Damage_A_Problem_in_the_Nano-_and_Macro-Range (дата обращения: 10.01.2026).

15. The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings / D.F. Busse [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*, March/April 1997. Vol. 33, no. 2. Pp. 567–576. URL: https://www.academia.edu/85626258/The_effects_of_PWM_voltage_source_inverters_on_the_mechanical_performance_of_rolling_bearings (дата обращения: 11.01.2026).

16. Короткевич С.В., Холодилов О.В. Оценка толщины смазочного слоя в подшипниках качения электрорезистивным методом // *Электронная*

библиотека Белорусско-Российского университета. 2017. URL: <http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/5056/382-388.pdf> (дата обращения: 11.01.2026).

17. Bearing Damage Analysis by Calculation of Capacitive Coupling Between Inner and Outer Races of a Ball Bearing / J. Adabi [et al.] // *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*. Poznan, Poland, 2008. Pp. 903–907. URL: https://www.researchgate.net/publication/224331398_Bearing_Damage_Analysis_by_Calculation_of_Capacitive_Coupling_between_Inner_and_Outer_Races_of_a_Ball_Bearing (дата обращения: 11.01.2026).

18. Binder A., Magdun O., Gemeinder Y. Calculation of Parasitic High Frequency Currents in Inverter-Fed AC Machines. URL: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/rd/ew_vortraege/100205_binder_magdun_gemeinder.pdf (дата обращения: 12.01.2026).

Дата поступления: 06.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

КАРМАНОВ Александр Валерьевич — ведущий инженер, магистрант; saxa.karmanov@yandex.ru

Calculation of Parasitic Capacitances of an Asynchronous Traction Motor with Variably-Frequency Drives

A. V. Karmanov

LLC “Ural Locomotives”, Regional Center, railway section River Slavyanka — LEP, Metallostroj, Saint Petersburg, 196641, Russia

For citation: *Karmanov A. V.* Calculation of Parasitic Capacitances of an Asynchronous Traction Motor with Variably-Frequency Drives // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 277–287. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-277-287 (In Russian)

Abstract

Purpose: theoretical calculation of parasitic capacitances in an asynchronous motor with variably-frequency drives in order to create a simulation model. **Methods:** application of electrical engineering principles to calculate the capacitance of planar and cylindrical capacitors and the structural characteristics of the asynchronous motor for computing the ideal equivalent of the motor’s parasitic capacitances. **Results:** a parasitic-capacitance equivalent circuit of the induction motor is proposed, parasitic capacitances of the

asynchronous motor are identified and replaced with ideal equivalent, methods for calculating the ideal equivalents of the parasitic capacitances of the traction asynchronous motor are proposed, and a simplified method for estimating the capacitance of a ball radial bearing based on the Hertzian contact area is presented. Comparisons are performed between data obtained theoretically, data obtained from measurement, and data from various sources. The proposed methods are simple to compute and provide satisfactory accuracy. **Practical significance:** theoretical calculation results are used in the motor's equivalent circuit when building a traction drive model in the Simulink simulation environment to assess the magnitude of the voltage applied to the bearing and the current flowing through it, to determine the potential path of high-frequency current through the bearings of a traction asynchronous motor, with the aim of developing further measures to reduce their influence and improve the reliability of the traction asynchronous motor bearing assembly.

Keywords: asynchronous motor, common-mode voltage, equivalent circuit, parasitic capacitance, bearing, bearing current

References

1. Singh H., Sudhoff S. D. A Common-Mode Shorting Network to Reduce Common-Mode Excitation of Three-Phase Two-Level Electric Drives, *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 2023, vol. 10, pp. 14–24. URL: https://www.academia.edu/103826562/A_Common_Mode_Shorting_Network_to_Reduce_Common_Mode_Excitation_of_Three_Phase_Two_Level_Electric_Drives (accessed: December 12, 2026).
2. GOST R 55136-2017/IEC/TS60034-25:2007. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. CHast' 25. Rukovodstvo po konstrukcii i karakteristikam mashin peremennogo toka, special'no prednaznachennyh dlya pitaniya ot preobrazovatelej [Rotating Electric Machines. Part 25. Guide to the Design and Characteristics of AC Machines Specifically Designed for Power Supply from Converters], Electronic Fund of Legal and Regulatory Documents. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103686> (In Russian)
3. Mahmoudian M., et al. An Impedance Source Multi-Level Three Phase Inverter with Common Mode Voltage Elimination and Dead Time Compensation. *Electronics*, 2020, no. 9, pp. 1639–1655. URL: https://www.researchgate.net/publication/344582701_An_Impedance_Source_Multi-Level_Three_Phase_Inverter_with_Common_Mode_Voltage_Elimination_and_Dead_Time_Compensation (accessed: December 15, 2025).
4. Adabi J., Zare F. Analysis, Calculation and Reduction of Shaft Voltage in Induction Generators, *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality*, Valencia, April 15–17, 2009. URL: <https://eprints.qut.edu.au/20191/1/20191.pdf>
5. Zhu W., et al. A Review of Modeling and Mitigation Techniques for Bearing Currents in Electrical Machines with Variable-Frequency Drives, *IEEE Access.*, 2022, vol. 10, pp. 125279–125297. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9964144> (accessed: December 20, 2025).
6. Muetze A., Binder A. Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Drive Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, May–June 2007, vol. 43, no. 3, pp. 665–672. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4215013>
7. Ahola J., et al. Normalization-Based Approach to Electric Motor BVR Related Capacitances Computation, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2018, USA, San Antonio, pp. 2868–2874. URL: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159886/ahola_et_al_normalization-based_approach_final_draft.pdf (accessed: December 25, 2025).
8. Binder A., Muetze A. Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, May–June 2008, vol. 44, no. 3, pp. 769–776. URL: https://www.researchgate.net/publication/3175055_Scaling_Effects_of_Inverter-Induced_Bearing_Currents_in_AC_Machines (accessed: December 27, 2025).

9. Tulupov V. D., Sleptsov M. A., Briedis A. A. Metody povysheniya nadezhnosti raboty podshipnikov v tyagovyh asinhronnykh mashinah [Ways to Improve the Reliability of Bearings in Traction Induction Machines.], *Vestnik MEI [Bulletin of MPEI]*, 2021, no. 2, pp. 60–70. URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/695> (In Russian)
10. Tawfiq K. B., Güleç M., Sergeant P. Bearing Current and Shaft Voltage in Electrical Machines: A Comprehensive Research Review, *Machines*, 2023, no. 11, 550 p. URL: https://www.academia.edu/106269225/Bearing_Current_and_Shaft_Voltage_in_Electrical_Machines_A_Comprehensive_Research_Review (accessed: January 04, 2026).
11. Han P., et al. Modeling of Bearing Voltage in Electric Machines Based on Electromagnetic FEA and Measured Bearing Capacitance, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Sept.-Oct. 2021, vol. 57, no. 5, pp. 4765–4775. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9465698>
12. Furtmann A., Gerhard P. Evaluation of Oil-Film Thickness Along the Path of Contact in a Gear Mesh by Capacitance Measurement, *Tribology Online*, 2016, no. 11, pp. 189–194. URL: https://www.researchgate.net/publication/301746461_Evaluation_of_Oil-Film_Thickness_Along_the_Path_of_Contact_in_a_Gear_Mesh_by_Capacitance_Measurement (accessed: January 06, 2026).
13. Becker-Dombrowsky F.M, Kirchner E. Electrical Impedance Based Condition Monitoring of Machine Elements — Systematic Review, *Frontiers in Mechanical Engineering*, July 2024, vol. 10. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2024.1412137/full>
14. Schneider V., et al. Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano- and Macro-Range, *Lubricants*, 2022, no. 10, 194 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/362838744_Electrical_Bearing_Damage_A_Problem_in_the_Nano-_and_Macro-Range (accessed: January 10, 2026).
15. Busse D. F., et al. The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, March -April 1997, vol. 33, no. 2, pp. 567–576. URL: https://www.academia.edu/85626258/The_effects_of_PWM_voltage_source_inverters_on_the_mechanical_performance_of_rolling_bearings (accessed: January 11, 2026).
16. Korotkevich S. V., Kholodilov O.V. Ocenka tolshchiny smazochного sloyaya v podshipnikah kacheniya elektrozestivnym metodom [Evaluation of the Thickness of a Lubricant Layer in Bearing Electroresistive Method], *Elektronnaya biblioteka Belorussko-Rossiyskogo universiteta [DSpace Home]*, 2017, pp. 382–388. URL: <http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/5056/382-388.pdf> (accessed: January 11, 2026). (In Russian).
17. Adabi J., et al. Bearing Damage Analysis by Calculation of Capacitive Coupling Between Inner and Outer Races of a Ball Bearing, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, Poland, 2008, pp. 903–907. URL: https://www.researchgate.net/publication/224331398_Bearing_Damage_Analysis_by_Calculation_of_Capacitive_Coupling_between_Inner_and_Outer_Races_of_a_Ball_Bearing (accessed: January 11, 2026).
18. Binder A., Magdun O., Gemeinder Y. Calculation of Parasitic High Frequency Currents in Inverter-Fed AC Machines. URL: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/rd/ew_vortraege/100205_binder_magdun_gemeinder.pdf (accessed: January 12, 2026).

Received: February 06, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author’s information:

Alexander V. KARMANOV — Lead Engineer,
Magister’s Student;
saxa.karmanov@yandex.ru

УДК 656.25 + 621.316.9 + 621.315.1

Методы защиты объектов железнодорожной автоматики и телемеханики от ударов молнии

А. Д. Соловьёв

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

Для цитирования: Соловьёв А. Д. Методы защиты объектов железнодорожной автоматики и телемеханики от ударов молнии // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 288–298. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-288-298

Аннотация

Цель: выполнить анализ современных методов молниезащиты зданий и высоковольтных линий 6–10 кВ, питающих устройства железнодорожной автоматики и телемеханики, и оценить их применимость с учетом типовых сценариев грозовых воздействий. Обосновать необходимость комплексной защиты вводов питания. **Методы:** проведен аналитический обзор научных публикаций, нормативных документов и эксплуатационных данных. Выполнена классификация внешних и внутренних систем молниезащиты, а также средств повышения грозостойкости высоковольтных линий. Сопоставлены принципы действия защитных устройств с основными сценариями воздействия молнии: прямым ударом, ударом в опору и близким разрядом с электромагнитной индукцией. **Результаты:** показано, что эффективность традиционных методов защиты зависит от условий эксплуатации и не может обеспечиваться изолированным применением отдельных средств. Выявлены ограничения использования грозозащитных тросов и установки ограничителей перенапряжений только на вводе питания. Обоснована необходимость учета волновых процессов в линии при выборе конфигурации защитных устройств и формирования защищенных подходов к объектам железнодорожной автоматики и телемеханики. **Практическая значимость:** реализация предложенного подхода позволяет снизить уровень импульсных перенапряжений на вводах питания и повысить надежность функционирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: молния, внешняя молниезащита, внутренняя молниезащита, средства защиты, молниезащита высоковольтных линий, железнодорожная автоматика и телемеханика

Введение

Удары молнии остаются одним из наиболее опасных природных факторов, воздействующих на промышленные и инфраструктурные объекты. Помимо прямых ударов, существенный ущерб обусловлен импульсными перенапряжениями (ПН) и электромагнитными наводками, приводящими к пробоям изоляции, деградации компонентов и отказам аппаратуры [1]. По данным международных наблюдений, ежегодные потери от грозовых воздействий исчисляются сотнями тысяч по-

вреждений и значительными экономическими затратами [2–5].

Для железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) проблема грозостойкости имеет особую значимость, поскольку отказ устройств может повлиять на безопасность движения поездов. Анализ эксплуатационных данных за 2014–2024 годы подтверждает высокую чувствительность систем ЖАТ к атмосферным ПН [6].

Несмотря на развитие методов молниезащиты и наличие нормативной базы, обеспечение

требуемого уровня защиты питающих воздушных линий 6–10 кВ и вводов электропитания остается сложной инженерной задачей.

Молниезащита зданий

В современной практике молниезащиту зданий подразделяют на внешнюю и внутреннюю¹. Внешняя система предназначена для перехвата прямого удара молнии и отвода тока в землю, внутренняя — для ограничения импульсных ПН и электромагнитных воздействий при прямых и близких разрядах.

Внешняя молниезащита включает молниеприемник, токоотвод и заземляющее устройство. Наиболее вариативным элементом является молниеприемник, выбор которого определяется геометрией объекта и требуемым уровнем защиты².

Классическим решением является стержневой молниеприемник (рис. 1) [7]. Его зона защиты определяется высотой установки, что ограничивает применение для объектов сложной формы. Для проектирования зон защиты используют метод катящейся сферы (МКС) и метод защитного угла³. МКС основан на моделировании сферы заданного радиуса, обкатывающей объект; метод защитного угла представляет собой упрощенную геометрическую интерпретацию. Оба метода имеют ограничения при защите протяженных и сложных сооружений [8].

Сетчатый молниеприемник реализует принцип работы клетки Фарадея и формирует практически сплошную защитную поверхность,

обеспечивая выравнивание потенциалов (рис. 2) [9]. Он предпочтителен для крупных объектов ЖАТ (посты ЭЦ, ДЦ), однако отличается большей трудоемкостью и стоимостью.

Тросовый молниеприемник представляет собой проводник, размещенный над защищаемым объектом [10]. Он формирует широкую зону защиты и эффективен для распределенных и линейных сооружений, но требует повышенной механической прочности и регулярного обслуживания (рис. 3).

На практике часто применяют комбинированные схемы, сочетающие сетчатые и стержневые элементы.

Отдельно следует отметить активные молниеприемники (АМП), принцип которых основан на ранней инициализации восходящего лидера [11]. В лабораторных исследованиях действительно зафиксировано некоторое уменьшение времени инициирования восходящего лидера по сравнению с традиционными решениями [12]. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что величина этого выигрыша во времени невелика и не приводит к статистически подтвержденному расширению зоны защиты в реальных условиях грозовой обстановки. Лабораторные

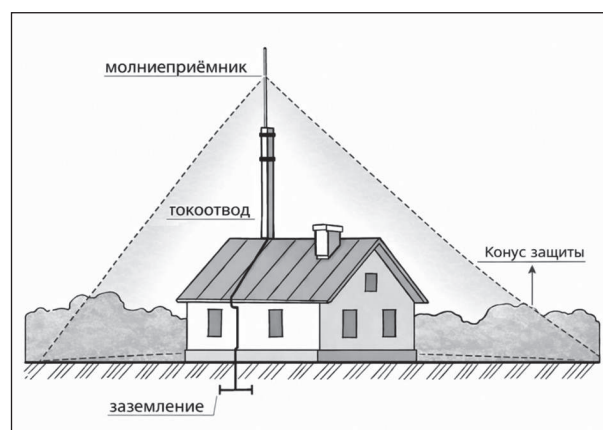


Рис. 1. Молниезащита со стержневым молниеприемником

¹ Версия стандарта от 1978 года. DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3): 2011-10. Blitzschutz. Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen. Norm. Berlin: VDE VERLAG, 2011.

² IEC 62305-3:2024. Protection against Lightning. Part 3.

³ IEEE Std 998-2002. IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations. New York: IEEE, 2002.

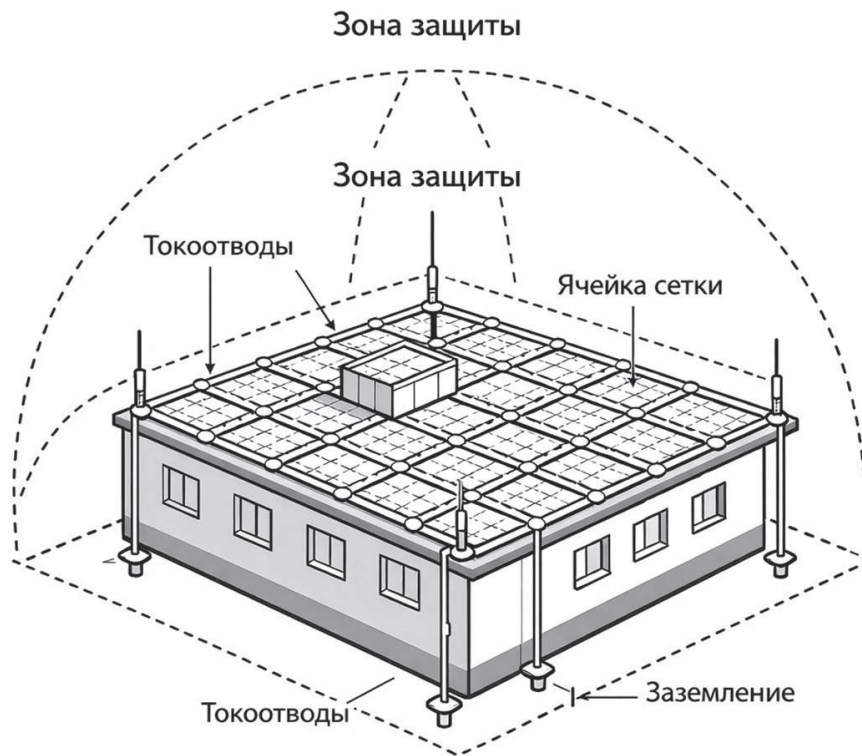


Рис. 2. Молниезащита с сетчатым молниеприемником

установки не воспроизводят пространственно-временную структуру атмосферного электрического поля и стохастический характер разви-

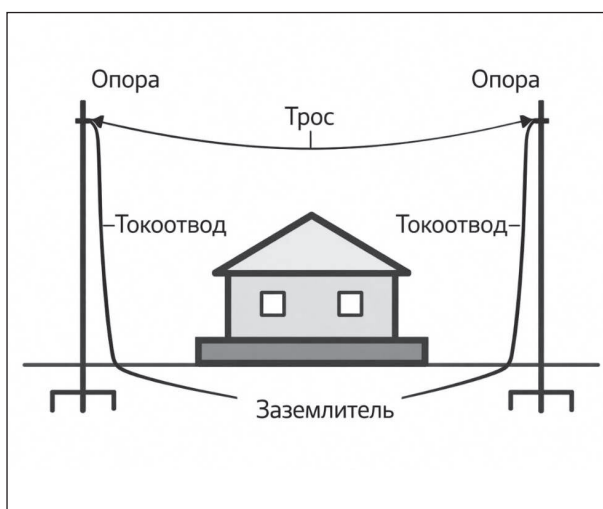


Рис. 3. Молниезащита с тросовым молниеприемником

тия лидеров, что ограничивает применимость результатов к натурным условиям.

Результаты полевых испытаний также не демонстрируют устойчивого увеличения радиуса защиты. В ряде случаев зафиксировано существенное расхождение между заявленными и фактическими характеристиками АМП [13, 14]. При этом в большинстве стран применение АМП либо не регламентировано национальными стандартами, либо прямо не признается действующей нормативной базой, что отражает отсутствие научного консенсуса относительно их эффективности. В связи с этим использование АМП для устройств ЖАТ представляется недостаточно обоснованным.

В таблице показано сравнение методов молниезащиты, описанных выше, с оценкой возможности применения их для защиты различных объектов ЖАТ.

ТАБЛИЦА. Сравнительная оценка методов молниезащиты

Метод	Принцип действия	Эффективность	Особенности применения	Для ЖАТ
Стержневой	Перехват прямого удара	Средняя	Простота, низкая стоимость	Компактные объекты, транспортабельные модули
Сетчатый	Эквипотенциальная поверхность	Высокая	Высокая трудоемкость	Крупные объекты, посты ЭЦ
Тросовый	Экранирование зон	Высокая	Повышенные механические требования	Условно нет
Активный	Ранняя инициализация лидера молнии	Неоднозначная	Ограниченная верификация	Нет

Методы защиты высоковольтных линий

Методы защиты ВЛ 6–10 кВ, питающих устройства ЖАТ, целесообразно рассматривать на примере вводов питания релейных шкафов (РШ), поскольку именно вводы являются наиболее уязвимым элементом системы «линия — объект». Импульсные ПН, распространяющиеся по линии при ударе молнии, непосредственно воздействуют на оборудование через ввод.

Классическим средством молниезащиты ВЛ является грозозащитный трос, подвешиваемый над фазными проводами [15]. Он предназначен для перехвата прямого удара и отвода тока в землю через опоры. Эффективность определяется геометрией экранирования и качеством заземления. Несмотря на предложения применения троса для защиты вводов питания ЖАТ [16], его использование связано с конструктивными и экономическими ограничениями (усиление опор, увеличение ветровой нагрузки, обслуживание). На рис. 4 показано применение грозозащитного троса для ввода питания в РШ. Поэтому тросовую защиту целесообразно рассматривать как локальную меру на участках с повышенной грозовой активностью.

Более распространенным методом повышения грозостойкости является применение

ограничителей перенапряжений (ОПН) [17]. Обычно ОПН устанавливаются у вводов питания, однако при интенсивных грозовых воздействиях этого может быть недостаточно из-за волновых процессов и переотражений на линии. Установка ОПН на каждой опоре экономически нецелесообразна, поэтому более рациональным является селективное размещение ОПН на наиболее неблагоприятных участках и у ввода. Выбор мест установки должен основываться на расчетной оценке распространения ПН, что требует применения математических моделей ВЛ с учетом параметров

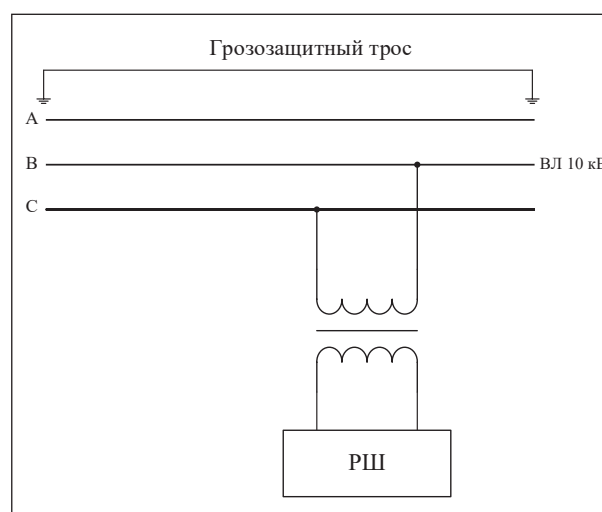


Рис. 4. Защиты ввода питания устройств ЖАТ при помощи грозозащитного троса

линии и характеристик средств защиты. Пример защиты вводов питания РШ с использованием ОПН приведен на рис. 5.

Помимо ОПН, для повышения грозостойкости ВЛ рассматривается ряд специализированных высоковольтных средств защиты, которые могут применяться для формирования защищенных подходов к вводам питания устройств ЖАТ (в сочетании с ОПН на вводе), одним из таких устройств являются мультикамерные разрядники (МКР) [18]. Принцип действия МКР отличается от ОПН: гашение электрической дуги при грозовом воздействии происходит в многокамерной системе с большим числом воздушных промежутков,

что способствует эффективному охлаждению и дроблению дугового канала. К важным эксплуатационным особенностям относится то, что энергия импульса в значительной степени рассеивается вне основного конструктивного объема, благодаря чему защитные свойства устройства могут сохраняться после единичных воздействий. Производители МКР предлагают использовать их для защиты вводов питания (пример приведен на рис. 6). Применение МКР в задачах ЖАТ целесообразно рассматривать как дополнение к ОПН на вводе, однако для корректного выбора схемы включения и мест размещения требуется расчетная проверка эффективности (моделирование

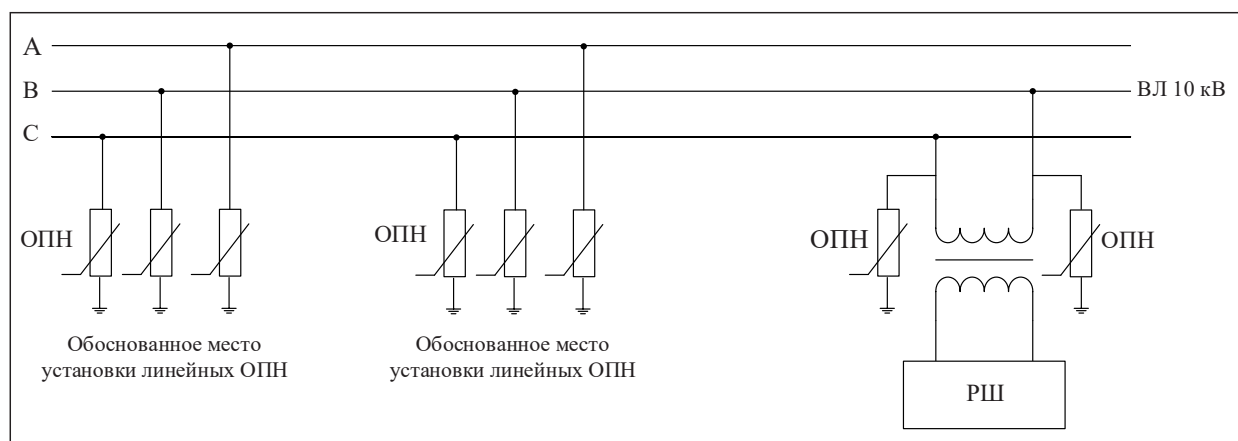


Рис. 5. Защита вводов питания устройств ЖАТ при помощи ОПН

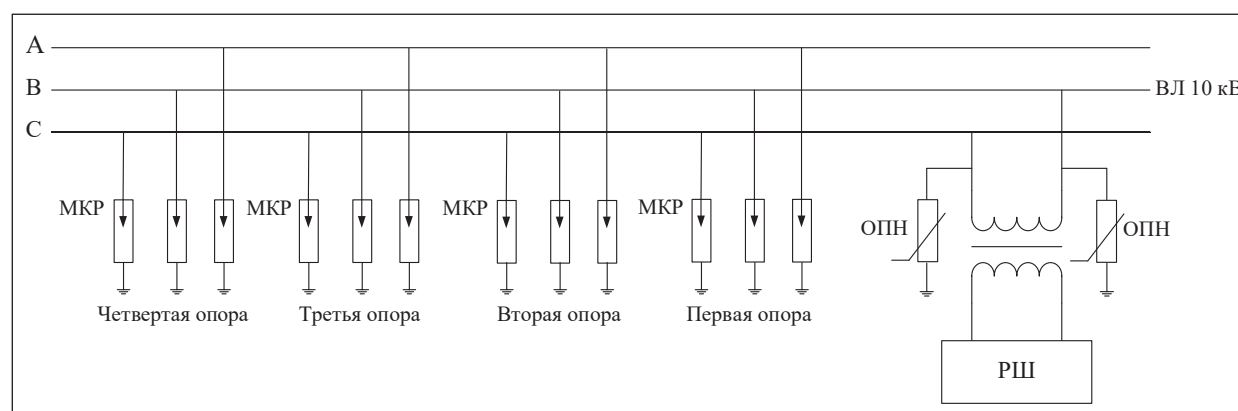


Рис. 6. Защита вводов питания устройств ЖАТ при помощи МКР

грозового воздействия на конкретной линии и объекте).

Также интерес вызывают активные дугогасящие искровые промежутки (АДИП). АДИП относятся к классу устройств, в которых после пробоя и возникновения дуги формируется газовый поток в дугогасящей камере, резко охлаждающий и удлиняющий дуговой канал, что приводит к быстрой деионизации и гашению дуги [19]. Для объектов ЖАТ АДИП целесообразно рассматривать как дополнительное средство в составе комплексной защиты (например, совместно с ОПН у вводов питания), при этом требуются экспериментальные подтверждения эффективности для типовых схем, питающих ВЛ 10 кВ.

Особый интерес вызывают средства защиты под названием «триггерные дуговые промежутки» (ТДП). Данное устройство представляет собой воздушный (газовый) искровой промежуток, применяемый для практически мгновенного пробоя при возникновении ПН с целью отвода тока молнии в землю до момента, когда ПН достигнет уровня перекрытия изоляции.

В отличие от базовых искровых промежутков ТДП принудительно вызывает дугу с помощью триггерного модуля, то есть реализуется принцип раннего срабатывания. Практический интерес к ТДП связан с потенциально меньшей зависимостью эффективности от сопротивления заземления, что особенно важно для линий на участках со сложными грунтовыми условиями. Для внедрения ТДП в схемы защиты питающих линий ЖАТ также необходимы расчетные и/или натурные исследования, подтверждающие снижение уровня перенапряжений и отсутствие нежелательных режимов, например устойчивого дугового процесса.

Рассмотрим типовые воздействия ударов молнии на ВЛ, питающие устройства ЖАТ. На основе обобщения литературных источни-

ков [20–25] можно выделить наиболее характерные сценарии воздействия молнии на ВЛ:

1. Прямой удар молнии в фазные провода ВЛ. Сопровождается введением большого импульсного тока в линии и формированием бегущих волн ПН.

2. Удар молнии в опору ВЛ или в заземляющее устройство. В этом случае формируется ПН по причине подъема потенциала опоры и устройств заземления, а также из-за электромагнитной связи между опорой и фазными проводами.

3. Удар молнии вблизи ВЛ. В данном случае основным воздействием является электромагнитная индукция (ЭМИ), которая приводит к появлению наведенных ПН в фазных проводах.

Данные сценарии отличаются формой и уровнем ПН, соответственно, и требованиями к средствам защиты, что делает универсальные решения молниезащиты малоэффективными.

Сопоставление рассмотренных сценариев с применяемыми средствами защиты показывает следующее: установка ОПН лишь на вводе питания качественно снижает амплитуду ПН в момент прихода импульса, однако неэффективно предотвращает ПН, связанные с переотражениями волн на линии.

Использование грозозащитных тросов снижает вероятность прямого удара молнии в фазные провода, но практически не влияет на наведенные ПН, возникающие при ударах в опоры ВЛ. Кроме того, экономические и эксплуатационные ограничения существенно сужают область их применения.

Использование дополнительных средств защиты на линии позволяет перераспределить энергию удара молнии и снизить уровень ПН, однако эффективность таких решений существенно зависит от места установки и правильной координации с ОПН на вводе питания.

Результаты анализа позволяют обосновать необходимость организации так называемых защищенных подходов к вводу питания устройств ЖАТ. Под защищенным подходом понимается участок ВЛ, на котором реализуется поэтапное ограничение атмосферных ПН за счет селективного размещения средств защиты, обеспечивающее снижение как амплитуды, так и энергии ПН, достигающих вводов питания. В отличие от защиты только на вводе защищенный подход учитывает волновые процессы в ВЛ, а также снижает зависимость эффективности защиты от параметров заземления.

Заключение

Проведенный анализ показал, что для объектов ЖАТ ключевыми факторами эффективности молниезащиты являются повышение грозостойкости питающих воздушных линий 10 кВ и корректная организация подходов к вводам электропитания. Наибольший ущерб связан с импульсными ПН, распространяющимися по линии, и сопутствующими электромагнитными воздействиями.

Установлено, что защита только на вводе питания в ряде случаев недостаточна из-за волновых процессов, переотражений и влияния параметров заземления. Применение грозозащитных тросов ограничено конструктивными и экономическими факторами и может рассматриваться преимущественно как локальное решение. Обоснована целесообразность формирования защищенных подходов, предусматривающих селективное размещение средств защиты на линии и у ввода. Такой подход обеспечивает снижение амплитуды и энергии перенапряжений и уменьшает зависимость эффективности защиты от характеристик линии и заземления.

Молниезащита зданий остается необходимым элементом обеспечения грозостойкости,

однако не может рассматриваться как достаточная мера без одновременного повышения устойчивости питающих ВЛ.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на развитие и верификацию расчетных моделей воздействия молнии на ВЛ 10 кВ с учетом волновых процессов и параметров линии, что позволит перейти к обоснованному проектированию систем молниезащиты и снижению отказов устройств ЖАТ при экономически оправданных затратах.

Список источников

1. Rakov V. A., Uman M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge. New York: Cambridge University Press, 2003. 687 p. DOI: 10.1017/CBO9781107340886
2. NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). Storm Events Database. Интерфейс поиска и просмотра записей о метеорологических событиях, включая Lightning. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/stormevents/> (дата обращения: 20.12.2025).
3. Insurance Information Institute (Triple-I). *Facts + Statistics: Lightning*. Homeowners Insurance Claims and Payout for Lightning Losses, 2017–2024. URL: <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-lightning> (дата обращения: 20.12.2025).
4. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV). *Fallzahl auf Rekordtief, dennoch höhere Schäden. Blitzbilanz, 2020–2024*. Medieninformation. URL: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/fallzahl-auf-rekordtief-dennoch-hoehere-schaeden-69086> (дата обращения: 20.12.2025).
5. General Insurance Rating Organization of Japan (GIROJ). *Overview of Fire Insurance and Earthquake Insurance: FY 2024 Edition (FY 2023 Statistics)*, 2025. URL: https://www.giroj.or.jp/publication/outline_k/k_2024.pdf (дата обращения: 20.12.2025).
6. Соловьёв А. Д., Манаков А. Д. Анализ воздействия атмосферных перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики //

Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 4. С. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302. EDN MYPJAE

7. Rakov V. A. Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building. Part II: Numerical Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. 2008. Vol. 23, no. 4. Pp. 2447–2455. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923075

8. Rakov V. A. Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection // Journal of Lightning Research. 2012. Vol. 4.

9. Arévalo L., Cooray V. ‘The Mesh Method’ in Lightning Protection Standards — Revisited // Journal of Electrostatics. 2010. Vol. 68, iss. 4. Pp. 311–314. DOI: 10.1016/j.elstat.2010.03.003

10. Colon J. L. Lightning Protection and Instrumentation at Kennedy Space Center // Proceedings of the Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI’2005) “Advances in Engineering and Technology: A Global Perspective”. Cartagena de Indias, Colombia, 8–10 June 2005. No. 82. Pp. 1–11.

11. Tests of the “Early Streamer Emission” Principle for Protection Against Lightning / N. L. Allen, K. J. Cornick, D. C. Faircloth, C. M. Kouzis // IEE Proceedings — Science, Measurement and Technology. 1998. Vol. 145, no. 5. Pp. 200–206. DOI: 10.1049/ip-smt:19982209

12. VanBrunt R. J., Nelson T. L., Stricklett K. L. Early Streamer Emission Lightning Protection Systems: an Overview // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2000. Vol. 16, no. 1. Pp. 5–24. DOI: 10.1109/57.817418

13. Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal Versus a Franklin Rod / L. Pecastaing [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22, no. 2. Pp. 789–798. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004629

14. The Bell Tower Incident at Sigolsheim: Investigation Report on the Lightning Strike to the

Church Tower Equipped with an ESE Air Terminal. Technical report. France, Sigolsheim, 1996.

15. Armstrong H. R., Whitehead E. R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1968. Vol. PAS-87, no. 1. Pp. 270–281.

16. Манаков А. Д., Балуев Н. Н. Усиление защиты вводов питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при близких грозовых разрядах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 1 (26). С. 73–80.

17. Lightning Protection of Overhead Distribution Lines Installed on High Resistivity Soil / J. O. S. Paulino [et al.] // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 209. P. 107952. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107952

18. Belskii R. A., Frolov V. Ya., Podporkin G. V. Electric Strength of Arrester for Lightning Shielding of 6–35 kV Transmission Line with Lightning Overvoltage // Journal of Mining Institute. 2018. Vol. 232. Pp. 401–406. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.401

19. Wang J.-F., Wu D. Development of an Arc-Extinguishing Lightning Protection Gap for 35 Kv Overhead Power Lines // IET Generation, Transmission & Distribution, 2017. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0377

20. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines / C. A. Nucci [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1993. Vol. 35, no. 1. Pp. 75–86. DOI: 10.1109/15.219546

21. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis on Lightning-Induced Voltages / F. Rachidi [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1997. Vol. 39, no. 2. Pp. 65–89. DOI: 10.1109/15.581994

22. Grcev L., Popov M. On High-Frequency Behavior of Grounding Systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, no. 2. Pp. 1598–1606. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839200

23. Visacro S., Soares A. Harmonic Analysis of Grounding Systems Exposed to Lightning Currents // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, no. 1. Pp. 570–576. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.832347

24. Andreotti A., Falcone U., Verolino L. Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Power Lines: Influence of the Strike Location // Electric Power Systems Research. 2010. Vol. 80, no. 6. Pp. 682–689. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.11.003

25. Cooray V. The Lightning Flash. London: Institution of Engineering and Technology, 2014. 744 p.

Дата поступления: 20.02.2026

Решение о публикации: 10.04.2026

Контактная информация:

СОЛОВЬЁВ Александр Дмитриевич – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», инженер отдела учебной работы передовой инженерной школы «Интегрированные системы комплексной распределенной архитектуры»; Shura.Solovyov.01@mail.ru

Methods for Protecting Railway Automation and Remote Control Facilities from Lightning Strikes

A. D. Solov'yov

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

For citation: *Solov'yov A. D. Methods for Protecting Railway Automation and Remote Control Facilities Against Lightning Strikes // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 288–298. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-288-298 (In Russian)*

Abstract

Objective: to analyze modern lightning protection methods for buildings and 6–10 kV overhead lines supplying railway automation and remote control (ЖАТ) systems, and to assess their applicability considering typical lightning impact scenarios. To substantiate the necessity of an integrated approach to protecting power supply inputs. **Methods:** an analytical review of scientific publications, regulatory documents, and operational data was conducted. External and internal lightning protection systems, as well as methods for improving the lightning performance of overhead lines, were classified. The operating principles of protective devices were compared with the main lightning impact scenarios, including direct strikes to phase conductors, strikes to poles or grounding systems, and nearby strikes causing electromagnetic induction. **Results:** it is shown that the effectiveness of conventional protection methods strongly depends on operating conditions and cannot be ensured by isolated application of individual measures. Limitations of shield wires and the installation of surge arresters only at power supply inputs are identified. The necessity of accounting for traveling wave processes in overhead lines when selecting protective device configurations and implementing “protected approaches” to railway automation facilities is substantiated. **Practical significance:** the proposed approach reduces impulse overvoltages at power supply inputs and improves the reliability of railway automation and remote control systems.

Keywords: lightning, external lightning protection, internal lightning protection, protective devices, lightning protection of high-voltage lines, railway automation and remote control

References

1. Rakov V. A., Uman M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge. New York: Cambridge University Press, 2003, 687 p. ISBN 0-521-58327-6. DOI: 10.1017/CBO9781107340886
2. NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). Storm Events Database. The Interface for Searching and Viewing Records of Meteorological Events, Including “Lightning”. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/stormevents/> (accessed: December 12, 2025).
3. Insurance Information Institute (Triple-I). Facts + Statistics: Lightning. Homeowners Insurance Claims And Payout for Lightning Losses, 2017–2024. URL: <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-lightning> (accessed: December 12, 2025).
4. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV). Fallzahl auf Rekordtief, Dennoch Höhere Schäden. Blitzbilanz, 2020–2024. Medieninformation. URL: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/fallzahl-auf-rekordtief-dennoch-hoehere-schaeden-69086> (accessed: December 12, 2025).
5. General Insurance Rating Organization of Japan (GIROJ). Overview of Fire Insurance and Earthquake Insurance: FY 2024 Edition (FY 2023 Statistics). Published: April 2025. URL: https://www.giroj.or.jp/publication/outline_k/k_2024.pdf (accessed: December 12, 2025).
6. Solov'yov A. D., Manakov A. D. Analiz vozdeystviya atmosferykh perenapryazhenij na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki [Analysis of the Effects of Atmospheric Overvoltages on Railway Automation and Telemechanics Devices], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 4, pp. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302, EDN MYPJAE (In Russian)
7. Rakov V. A. Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building. Part II: Numerical Modeling, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 2447–2455. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923075
8. Rakov V. A. Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection, *Journal of Lightning Research*, 2012, vol. 4.
9. Arévalo L., Cooray V. “The Mesh Method” in Lightning Protection Standards — Revisited, *Journal of Electrostatics*, 2010, vol. 68, iss. 4, pp. 311–314. DOI: 10.1016/j.elstat.2010.03.003
10. Colon J. L. Lightning Protection and Instrumentation at Kennedy Space Center, *Proceedings of the Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2005) “Advances in Engineering and Technology: A Global Perspective”*. Cartagena de Indias, Colombia, 8–10 June 2005, no. 82, pp. 1–11.
11. Allen N. L., Cornick K. J., Faircloth D. C., Kouzis C. M. Tests of the “Early Streamer Emission” Principle for Protection Against Lightning, *IEEE Proceedings — Science, Measurement and Technology*, 1998, vol. 145, no. 5, pp. 200–206. DOI: 10.1049/ip-smt:19982209
12. Van Brunt R. J., Nelson T. L., Stricklett K. L. Early Streamer Emission Lightning Protection Systems: An Overview, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2000, vol. 16, no. 1, pp. 5–24. DOI: 10.1109/57.817418
13. L. Pecastaing, et al. Experimental Demonstration of the Effectiveness of an Early Streamer Emission Air Terminal Versus a Franklin Rod, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 789–798. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004629
14. The Bell Tower Incident at Sigolsheim: Investigation Report on the Lightning Strike to the Church Tower Equipped with an Ese Air Terminal. Technical Report, France, Sigolsheim, 1996.
15. Armstrong H. R., Whitehead E. R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1968, vol. PAS-87, no. 1, pp. 270–281.
16. Manakov A. D., Baluev N. N. Usilenie zashchity vvodov pitaniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki pri blizkikh grozovykh razryadakh

[Strengthening the Protection of Power Inputs for Railway Automation and Telemechanics Devices in Case of Near Lightning Discharges], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]*, 2011, no. 1 (26), pp. 73–80. (In Russian)

17. Paulino J.O.S., et al. Lightning Protection of Overhead Distribution Lines Installed on High Resistivity Soil. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107952

18. Belskii R.A., Frolov V.Ya., Podporokin G.V. Electric Strength of Arrester for Lightning Shielding of 6–35 kV Transmission Line with Lightning Overvoltage, *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 232, pp. 401–406. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.401

19. Wang J.-F., Wu D. Development of an Arc-Extinguishing Lightning Protection Gap for 35 Kv Overhead Power Lines, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0377

20. Nucci C. A., et al. Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, vol. 35, no. 1, pp. 75–86. DOI: 10.1109/15.219546

21. Rachidi F., et al. A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Special Emphasis on Lightning-Induced Voltages, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1997, vol. 39, no. 2, pp. 65–89. DOI: 10.1109/15.581994

22. Grcev L., Popov M. On High-Frequency Behavior of Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 1598–1606. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839200

23. Visacro S., Soares A. Harmonic Analysis of Grounding Systems Exposed to Lightning Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 570–576. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.832347

24. Andreotti A., Falcone U., Verolino L. Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Power Lines: Influence of the Strike Location, *Electric Power Systems Research*, 2010, vol. 80, no. 6, pp. 682–689. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.11.003

25. Cooray V. *The Lightning Flash*. London, Institution of Engineering and Technology, 2014, 744 p. ISBN 978-1-84919-438-5.

Received: February 20, 2026

Accepted: April 10, 2026

Author's information:

Alexander D. SOLOV'YOV — Postgraduate Student of the Department “Automation and Telemechanics on Railways”, Engineer of the Department of Educational Work, Advanced Engineering School Integrated Systems of Complex Distributed Architecture; Shura.Solovyov.01@mail.ru

УДК 625.171

Сравнительный анализ технологий воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования для диагностики железнодорожного пути: критерии выбора на основе оценки точности, производительности и эксплуатационных ограничений

Ф. В. Чеснович

Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Дирекция транспортного строительства», Россия, 194044, Санкт-Петербург, Нейшлотский пер., 8

Для цитирования: Чеснович Ф. В. Сравнительный анализ технологий воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования для диагностики железнодорожного пути: критерии выбора на основе оценки точности, производительности и эксплуатационных ограничений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 299–308. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-299-308

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос о необходимости разработки и последующем обосновании выбора оптимальной технологии лазерного сканирования для решения задач диагностики железнодорожного пути в контексте многообразия современных методов съемки. Актуальность работы обусловлена необходимостью формализации процесса выбора между воздушным (ВЛС), мобильным (МЛС) и наземным (НЛС) лазерным сканированием для получения достоверной пространственной информации об объектах инфраструктуры. **Методы:** в основе исследования лежит сравнительный анализ технических и эксплуатационных параметров трех указанных технологий. Сопоставление проводилось по совокупности критериев, включающих такие параметры, как точность (абсолютная), детализация (плотность точек), производительность (линейная), зависимость от графика движения поездов, зависимость от погодных явлений, основные «мертвые зоны», экономика (условная стоимость съемки 1 км). Анализ выполнялся с учетом специфики линейно-протяженных и точечных объектов железнодорожной инфраструктуры. **Результаты:** в процессе исследования было установлено, что эффективное применение каждой из технологий детерминировано спецификой решаемых инженерных задач. Выявлена иерархическая структура приоритетов выбора, где требования к метрической точности и детализации модели выступают в качестве доминирующего фактора (первичного фильтра). Данный фильтр задает допустимый диапазон производительности и технических возможностей, которые, в свою очередь, корректируются экономической целесообразностью и эксплуатационными ограничениями конкретного проекта. Также были определены области эффективного применения для каждой технологии. **Практическая значимость:** сформулированные критерии позволяют формализовать процедуру технологического аудита на этапе предпроектных изысканий. Применение разработанного подхода минимизирует риски получения недостоверных данных, оптимизирует затраты и обеспечивает требуемую полноту и детальность исходной информации для последующего проектирования, строительства, реконструкции и ведения цифровых моделей инфраструктуры (ВИМ/ТИМ).

Ключевые слова: лазерное сканирование, диагностика железнодорожного пути, воздушное лазерное сканирование (ВЛС), мобильное лазерное сканирование (МЛС), наземное лазерное сканирование (НЛС), точность, производительность, цифровая модель пути

Введение

Актуальность внедрения высокоточных и высокопроизводительных методов диагностики состояния железнодорожного пути обусловлена повышением требований безопасности и регулярности движения в условиях роста нагрузок и скоростей [1]. Традиционные геодезические методы, такие как нивелирование и тахеометрическая съемка, обеспечивая высокую точность на уровне 1–2 мм, являются трудоемкими, малоэффективными для обследования протяженных участков и создают значительные риски для персонала, работающего в габарите подвижного состава.

Лазерное сканирование, позволяющее в автоматизированном режиме получать детальные и высокоплотные облака точек, представляет собой технологическую основу для создания цифровых двойников инфраструктуры [2]. Однако существующий технологический парк включает разнородные платформы, принципиально различающиеся по своим метрологическим и эксплуатационным характеристикам. Это порождает проблему обоснованного выбора, где некорректное решение может привести либо к недопустимым погрешностям в оценке параметров пути, либо к неоправданному росту затрат и сроков выполнения работ.

Таким образом, целью данной работы является систематизация областей эффективного применения технологий ВЛС, МЛС и НЛС на основе сравнительного анализа их точности, производительности и эксплуатационных ограничений.

Методология

Исследование построено на сравнительном анализе характеристик и возможностей технологий. Анализ точности базируется на оценке совокупной погрешности определения координат точки, которая складывается из погреш-

ностей позиционирования платформы (GNSS-INS) — система, которая объединяет данные глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) и инерциальной навигационной системы (INS). Такая комбинация позволяет преодолеть ограничения каждой из систем.

GNSS (Global Navigation Satellite System) — это глобальная навигационная спутниковая система, которая определяет местоположение, скорость движения и время объектов на земной поверхности, в воздушном и морском пространствах. INS (Inertial Navigation System) — автономная навигационная система, которая использует принципы инерциальной навигации для определения местоположения, ориентации и скорости объекта, угловой точности сканера и точности измерения дальности по принципу времени импульсного или фазового метода [3].

Производительность оценивается комплексно через показатель линейной скорости съемки (км/ч) и удельную плотность точек на единицу площади или длины пути. Под эксплуатационными ограничениями понимаются внешние и внутренние факторы, влияющие на возможность и экономическую целесообразность проведения съемки:

- зависимость от графика движения поездов и необходимости предоставления «окон»;
- требования к метеоусловиям (облачность, видимость, осадки);
- необходимость наземного доступа и охраны оборудования;
- энергоемкость системы;
- сложность рельефа и застройки прилегающей территории, создающие «мертвые зоны».

Новизна исследования

Проведенный сравнительный анализ не ограничивается констатацией известных тех-

нических характеристик технологий лазерного сканирования. Научная новизна работы заключается в разработке и обосновании иерархической системы критериев выбора, адаптированной спецификацией к задачам диагностики железнодорожного пути. В отличие от существующих подходов, где выбор часто базируется на одном параметре (например, точности) или субъективном опыте, в данном исследовании предлагается последовательная многоуровневая модель принятия решения.

Первичным фильтром в ней выступают принципиальные метрологические требования к данным (точность, детализация), которые однозначно определяют применяемый класс технологий.

Вторичным фильтром предлагается считать операционные требования по охвату и производительности, которые оптимизируют выбор внутри группы технологий лазерного сканирования, объединенных схожестью принципиального уровня точности и детализации выходных данных.

Третичным фильтром может быть принят комплекс эксплуатационных и экономических ограничений, окончательно определяющих целесообразность применения технологии в конкретных условиях.

Кроме того, новизна заключается в четком разграничении областей использования каждой технологии в рамках единого диагностического цикла: картографирование объекта с помощью ВЛС, проведение оперативного мониторинга линейных параметров мобильным лазерным сканированием и на завершающей стадии — проведение точечного детального анализа узловых объектов на основе НЛС.

Такой системный взгляд позволяет преодолеть традиционное противопоставление технологий и рассматривать их как взаимо-

дополняющие элементы цифрового контура управления инфраструктурой.

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС)

Технология ВЛС реализуется с использованием летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, БПЛА), оснащенных лидарными системами. Ключевым преимуществом ВЛС является высокая производительность, позволяющая за один вылет получать данные на сотни километров пути, охватывая площадь 140–200 км² за час съемки в зависимости от высоты и типа носителя [4]. Эта технология незаменима для решения задач крупномасштабного картографирования, создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ) на протяженных участках, оценки планового и высотного положения трассы в сложных топографических условиях, например при проектировании обходов или новых ходов.

Однако точность ВЛС, в первую очередь плановая, ограничена точностью бортовой инерциальной навигационной системы (БИНС) и GNSS-приемника. Типичная абсолютная точность современных систем ВЛС составляет 0,05–0,15 м в плане и 0,03–0,10 м по высоте при полете на высоте 500–1000 м [5]. Такой уровень не позволяет достоверно оценивать субсантиметровые параметры, такие как ширина рельсовой колеи или продольные неровности рельсов. Эксплуатационные ограничения ВЛС значительны: проведение съемки требует согласования воздушного пространства, критически зависит от погодных условий (низкая облачность, осадки, сильная болтанка), а также сопряжено с высокими капитальными затратами на аренду авиатехники и организацию полетов. Как отмечается в работе [6], ВЛС эффективно для инвентаризационного обследования широких полос отвода, выявления крупных деформаций земляного полотна,

но не для детальной диагностики верхнего строения пути.

Мобильное лазерное сканирование (МЛС)

Системы МЛС, устанавливаемые на железнодорожный подвижной состав (локомотивы, мотовозы, дрезины), представляют собой оптимальный инструмент для оперативной диагностики геометрии пути. Они сочетают высокую линейную производительность (до 50–80 км/ч, то есть в ритме движения по «окнам») с повышенной точностью.

Погрешность определения координат рельсовой нити, достигаемая за счет синхронной регистрации данных сканера, GNSS и инерциального блока с последующей строгой обработкой и привязкой к исходным пунктам, может составлять 2–5 мм в плане и по высоте [7]. Это позволяет не только оценивать планово-высотное положение пути, но и детально анализировать его геометрические параметры, включая ширину колеи, положение рельсовых нитей в плане и профиле, а также выявлять просадки, перекосы и другие дефекты.

Главным эксплуатационным ограничением МЛС является жесткая привязка к «окнам» в графике движения поездов, что усложняет логистику и увеличивает сроки выполнения работ на напряженных участках. Кроме того, при съемке с высокой скоростью возникает проблема «мертвых зон» в зоне непосредственно под и вокруг платформы, а также ограниченного качества данных о подрельсовом основании и откосах земляного полотна из-за геометрии обзора. Как показано в исследованиях [8], МЛС является базовой технологией для создания цифровых моделей рельсовой колеи (Digital Track Model) и регулярного мониторинга ее состояния в рамках системы путеизмерений.

Наземное лазерное сканирование (НЛС)

Стационарные наземные лазерные сканеры (НЛС) обеспечивают наивысшую детальность и локальную точность данных, которая может достигать 1–3 мм на расстоянии до 50–100 м в зависимости от класса прибора [9]. Эта технология является незаменимой для детального обследования сложных инженерных объектов: мостов, путепроводов, тоннелей, станционных сооружений, стрелочных переводов. НЛС позволяет получать исчерпывающую информацию о состоянии не только верхнего строения пути, но и всех элементов искусственных сооружений, включая геометрию опор, деформации пролетных строений, износ контактной сети, фиксацию трещин и сколов.

Основным недостатком НЛС является крайне низкая производительность при обследовании протяженных линейных объектов. Процесс требует многократной перестановки сканера (с шагом 20–70 м) для обеспечения перекрытия сканов, сопряжен с организацией наземного доступа и охраны оборудования на каждом створе, что делает его трудоемким и продолжительным. Эксплуатация также сильно зависит от погодных условий (дождь, туман, прямые солнечные лучи) и наличия препятствий на линии визирования. Таким образом, как отмечено в методических рекомендациях [10], НЛС применяется точно, для решения локальных задач высокой важности, где критична максимальная детализация, например, для исполнительной съемки после ремонта стрелки или оценки дефектов в теле тоннеля.

Сравнительный анализ и критерии выбора

На основании проведенного анализа можно сформулировать иерархическую систему критериев выбора технологии лазерного

сканирования для диагностики железнодорожного пути. Сравнительный анализ технических и эксплуатационных параметров по видам лазерного сканирования приведен в табл. 1.

Первичным и определяющим критерием является требуемая точность и детализация выходных данных. Если задача ограничивается оценкой деформаций земляного полотна или общим картографированием полосы отвода, достаточно данных ВЛС. Если необходим точный мониторинг геометрии рельсовой колеи, используется МЛС. Для субмиллиметрового анализа конструкций искусственных сооружений выбирается НЛС.

Вторичным критерием выступает требуемая производительность и охват, которые напрямую коррелируют с экономикой проекта. Для съемки участков длиной в сотни километров ВЛС не имеет альтернатив по скорости. Для планово-предупредительного мониторинга состояния пути на сети протяженностью десятки километров оптимально МЛС. НЛС не рассматривается как метод сплошного обследования пути.

Третий уровень критериев — эксплуатационные ограничения, которые могут стать решающими. Наличие частых и длительных «окон» делает возможным применение МЛС. Отсутствие таких «окон» или необходимость съемки в активном движении (с определенными оговорками) может сместить выбор в сторону специализированных систем ВЛС с БПЛА или наземных сканирующих систем, устанавливаемых на ходовые тележки. Сложный рельеф и застройка делают ВЛС и МЛС взаимодополняющими для устранения «мертвых зон».

Рекомендуемые области применения технологий в зависимости от решаемых задач диагностики приведены в табл. 2.

Практическая и научная ценность

Результаты исследования обладают значительной практической ценностью для проектных, изыскательских и эксплуатационных подразделений железнодорожного транспорта. Разработанная система критериев предоставляет инженерам и технологам структурированный алгоритм для обоснования выбора технологии сканирования при составлении технических заданий и смет на выполнение диагностических работ. Это позволяет минимизировать риски получения данных неудовлетворительного качества или неоправданных финансовых затрат. Практические рекомендации способствуют оптимизации парка геодезического оборудования и повышению эффективности планово-предупредительных работ.

Научная ценность работы заключается в разработке методики комплексной оценки геотехнических изысканий и мониторинга для линейных сооружений. Исследование вносит вклад в технологию проектирования и эксплуатации транспортной инфраструктуры, формализуя взаимосвязь между техническими требованиями к диагностике, возможностями современных сенсорных технологий и эксплуатационными реалиями. Работа выполняет синтезирующую функцию, объединяя знания из области геодезии, фотограмметрии, навигации железнодорожного дела. Полученные выводы служат основой для дальнейших научных изысканий, в частности, в направлении разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений (DSS) для автоматизированного планирования диагностических кампаний, а также для создания алгоритмов слияния разнородных данных сканирования в единую прецизионную цифровую модель железнодорожного объекта (ВМ-модель), что является актуальной задачей в рамках концепции «Цифровая железная дорога».

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ технических и эксплуатационных параметров технологий лазерного сканирования

Параметр/Технология	Воздушное лазерное сканирование (ВЛС)	Мобильное лазерное сканирование (МЛС) на ж/д платформе	Наземное лазерное сканирование (НЛС)
Точность (абсолютная)	5–15 см (план) 3–10 см (профиль)	2–5 мм (относительная вдоль пути)	1–5 мм (на дистанции до 50 м)
Детализация (плотность точек)	10–50 тчк/м ²	500–5000 тчк/м ² (вдоль пути)	До 1000 тчк/м ² (на объекте)
Производительность (линейная)	140–200 км ² /час (сотни км пути)	50–80 км/ч (в «окно»)	0,5–2 км/сутки (при многократных установках)
Зависимость от графика движения	Отсутствует	Абсолютная (требуется «окно»)	Высокая (необходим доступ в габарит)
Зависимость от погоды	Критическая (нет полетов в облачность, дождь, ветер)	Умеренная (снег, дождь ухуд- шают получаемые данные)	Высокая (дождь, туман дела- ют съемку невозможной)
Основные «мертвые зоны»	Под мостами, в глубоких выемах, под густой растительностью	Под тележкой, низ откосов, частично балластная призма	Области, требующие перестановки сканера (эффект затенения)
Экономика (условная стоимость 1 км)	Низкая (1500–4500 руб./км) (при больших объемах)	Средняя (3000–8000 руб./км)	Высокая (от 15 000 до 50 000 и более руб./км)
Ключевое преимущество	Скорость и охват больших территорий для ЦММ/ЦМР	Оптимальный баланс точ- ности и производительности для контроля геометрии пути	Максимальная детализация и точность для обследования сложных объектов
Основное ограничение	Недостаточная точность для диагностики верхнего строения пути	Жесткая привязка к «окнам» и ограниченный обзор поперечного профиля	Крайне низкая скорость обследования протяженных объектов

ТАБЛИЦА 2. Рекомендуемые области применения технологий в зависимости от решаемых задач диагностики

Цель диагностики / Объект обследования	Рекомендуемая техно- логия (приоритет)	Альтернативная или допол- няющая технология	Получаемый результат и комментарии
Создание/обновление ЦММ, ЦМР полосы отвода	ВЛС (с беспилотного воздушного судна (БВС) или самолета)	Съемка с ИСЗ, аэрофотосъемка	Сплошная модель рельефа и местности шириной до 500 м. Основа для проектирования
Оценка плана и продольного профиля трассы	ВЛС	МЛС (при наличии «окон»)	Выявление крупных отклонений оси пути, оценка кривизны
Мониторинг геометрии рельсовой колеи (ширина, уровень, направление)	МЛС	Ручные измерения, вагоны-путеизмерители	Digital Track Model. Основной метод для регулярного контроля
Обследование земляного полотна (деформации откосов, косогоров)	ВЛС + МЛС	—	ВЛС — общий охват, МЛС — детализация вблизи пути. Комплексный анализ
Детальное обследование искусственных сооружений (мосты, путепроводы)	НЛС (внутри и снаружи)	МЛС (для общих деформаций пролетного строения)	Трехмерная BIM-модель конструкции для оценки износа, трещин, деформаций

Окончание табл. 2

Цель диагностики / Объект обследования	Рекомендуемая технология (приоритет)	Альтернативная или дополняющая технология	Получаемый результат и комментарии
Обследование тоннелей (деформации обделки, габариты)	НЛС (или мобильное для тоннелей)	Геодезические методы; мобильное сканирование	Точная модель внутренней поверхности
Инвентаризация и обследование станционных комплексов, стрелочных переводов	НЛС + МЛС (для ключевых узлов) + (для съемки путей)	—	НЛС — детальная модель стрелки, МЛС — положение путей в плане
Исполнительная съемка после ремонта/строительства железнодорожных путей	НЛС + МЛС (для локальных объектов) + (для пути)	Геодезические методы	Высокоточное сравнение «как построено» с проектом
Выявление препятствий в габарите приближения строений	МЛС + НЛС (основное) + (уточнение)	—	Анализ положения объектов вблизи пути

Примечание к таблицам. Приведенные количественные показатели являются обобщенными и могут варьироваться в зависимости от конкретного класса оборудования, условий съемки и методов обработки данных. Предложенная область применения основана на оптимальном соотношении «точность — производительность — затраты».

Заключение

Проведенный сравнительный анализ демонстрирует, что технологии воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования не конкурируют, а образуют единый технологический комплекс для многоуровневой диагностики железнодорожной инфраструктуры. ВЛС служит для решения задач верхнего уровня — создания геопространственной основы и выявления грубых деформаций. МЛС является основным рабочим инструментом для регулярного высокоточного контроля геометрии пути. НЛС служит для детального анализа уникальных и ответственных объектов.

Критериями выбора являются иерархически выстроенные требования: целевая точность; необходимая производительность и охват; преодолимость эксплуатационных ограничений. Перспективой развития является дальнейшая интеграция данных от разных платформ в единую информационную среду (BIM/GIS-платформу), а также автоматизация процессов дешифрирования дефектов на

основе алгоритмов машинного обучения, что позволит перейти от диагностики текущего состояния к прогнозной аналитике и оптимизации жизненного цикла объектов инфраструктуры.

Список литературы

- СП 119.13330.2024. СНиП 32-01-95. Железные дороги колеи 1520 мм. М.: Минстрой России, 2024.
- Воронов А.С., Зотов С.В. Цифровые двойники в транспортном строительстве: от концепции к внедрению // Транспортное строительство. 2020. № 5. С. 12–15.
- Землянов Д. В., Полецкий В. П. Теория и практика лазерного сканирования: учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2018. 164 с.
- Кашицин П. А. Применение воздушного лазерного сканирования для мониторинга линейных объектов на примере железных дорог // Геопрофи. 2019. № 3. С. 34–39.
- Глинский С.П., Карпилов В.С. Оценка точности воздушного лазерного сканирования при

инвентаризации железнодорожной инфраструктуры // Геодезия и картография. 2021. Т. 82, № 7. С. 44–52.

6. Инструкция по обследованию земляного полотна железных дорог с применением дистанционных методов (ВЛС, БПЛА). М.: ОАО «РЖД», 2018. 52 с.

7. Медиокритский С. О., Федоров Р. К. Точность мобильного лазерного сканирования при определении параметров железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 63–70.

8. Чесноков М. И., Макаров А. В. Наземное лазерное сканирование в обследовании мостовых сооружений // Вестник мостостроения. 2022. № 1 (95). С. 28–35.

9. РД-102-011-ОАО «РЖД». Руководство по геодезическому контролю и исполнительной съемке при строительстве и реконструкции искусственных сооружений с применением НЛС. М.: ОАО «РЖД», 2021. 65 с.

10. Цифровая железная дорога: концепция и пути реализации. М.: ОАО «РЖД», 2020. 80 с.

11. Иванов В. Н., Петров Е. А. Геоинформационные системы в транспортном строительстве. СПб.: ПГУПС, 2021. 218 с.

12. Смирнов А. В. Современные методы геодезического мониторинга транспортных сооружений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. № 4. С. 55–62.

13. Петров И. С., Соколов Н. В. Автоматизация обработки данных лазерного сканирования в задачах диагностики пути // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 6. С. 24–29.

14. Кузнецов Д. М. Интеграция разнородных геопространственных данных для создания цифровых моделей железных дорог // Геодезия и картография. 2023. № 2. С. 38–45.

Received: 20.02.2026

Accepted: 14.04.2026

Контактная информация:

ЧЕСНОВИЧ Федор Владимирович — аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; fedorkocmoc@gmail.com

Comparative Analysis of Aerial, Mobile and Terrestrial Laser Scanning Technologies for Railway Track Diagnostics: Selection Criteria Based on Accuracy, Productivity and Operational Constraints

F. V. Chesnovich

St. Petersburg State Public Institution “Directorate of Transport Construction”, 8 Neishlotskiy lane, Saint Petersburg, 194044, Russia

For citation: *Chesnovich F. V. Comparative Analysis of Aerial, Mobile and Terrestrial Laser Scanning Technologies for Railway Track Diagnostics: Selection Criteria Based on Accuracy, Productivity and Operational Constraints // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 299–308. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-299-308 (In Russian)*

Abstract

Objective: to consider the necessity of developing and substantiating the choice of optimal laser scanning technology for solving railway track diagnostics problems in the context of a variety of modern surveying methods. The relevance of the work is due to the need to formalize the selection process between aerial (ALS), mobile (MLS) and terrestrial (TLS) laser scanning to obtain reliable spatial information about

infrastructure objects. **Methods:** the research is based on a comparative analysis of technical and operational parameters of the three technologies. The comparison was carried out according to a set of criteria including such parameters as: absolute accuracy, detail (point density), linear productivity, dependence on train traffic schedule, dependence on weather conditions, main “dead zones”, economics (conditional cost of surveying 1 km). The analysis was performed taking into account the specifics of linearly extended and point objects of railway infrastructure. **Results:** the study found that the effective application of each technology is determined by the specifics of the engineering tasks to be solved. A hierarchical priority structure of choice is revealed, where the requirements for metric accuracy and detail of the model act as a dominant factor (primary filter). This filter sets the permissible range of productivity and technical capabilities, which in turn are adjusted by the economic feasibility and operational constraints of a particular project. Also, areas of effective application for each technology were determined. **Practical importance:** the formulated criteria make it possible to formalize the procedure of technological audit at the stage of pre-design surveys. The application of the developed approach minimizes the risks of obtaining unreliable data, optimizes costs and ensures the required completeness and detail of initial information for subsequent design, construction, reconstruction and maintenance of digital infrastructure models (BIM/TIM).

Keywords: laser scanning, railway track diagnostics, aerial laser scanning (ALS), mobile laser scanning (MLS), terrestrial laser scanning (TLS), accuracy, productivity, digital track model

References

1. SP 119.13330.2024. SNiP 32-01-95. Zheleznnye dorogi kolei 1520 mm [Set of Rules 119.13330.2024. Railways of 1520 mm gauge]. Moscow, *Minstroy Rossii [Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation Publ.]*, 2024. (In Russian)
2. Voronov A. S., Zotov S. V. Tsifrovye dvoyniki v transportnom stroitel'stve: ot kontseptsii k vnedreniyu [Digital Twins in Transport Construction: From Concept to Implementation], *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*, 2020, no. 5, pp. 12–15. (In Russian)
3. Zemlyanov D. V., Poletskij V. P. Teoriya i praktika lazernogo skanirovaniya [Theory and Practice of Laser Scanning], Moscow, *Izd-vo MIIGAiK [Moscow State University of Geodesy and Cartography Publ.]*, 2018, 164 p. (In Russian)
4. Kashitsin P. A. Primenenie vozdušnogo lazernogo skanirovaniya dlya monitoringa lineynykh ob'ektov na primere zheleznykh dorog [Application of Aerial Laser Scanning for Monitoring Linear Objects on the Example of Railways], *Geoprofi [Geoprofi]*, 2019, no. 3, pp. 34–39. (In Russian)
5. Glinskij S. P., Karpilov V. S. Otsenka tochnosti vozdušnogo lazernogo skanirovaniya pri inventarizatsii zheleznodorozhnoy infrastruktury [Accuracy Assessment of Aerial Laser Scanning for Railway Infrastructure Inventory], *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 2021, vol. 82, no. 7, pp. 44–52. (In Russian)
6. Instruksiya po obsledovaniyu zemlyanogo polotna zheleznykh dorog s primeneniem distantsionnykh metodov (VLS, BPLA) [Instruction for Inspection of Railway Subgrade Using Remote Methods (ALS, UAV)], Moscow, *OAO “RZhD” [JSC Russian Railways Publ.]*, 2018, 52 p. (In Russian)
7. Mediokritskij S. O., Fedorov R. K. Tochnost' mobil'nogo lazernogo skanirovaniya pri opredelenii parametrov zheleznodorozhnogo puti [Accuracy of Mobile Laser Scanning in Determining Railway Track Parameters], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Transport Technology]*, 2020, no. 2, pp. 63–70. (In Russian)
8. Chesnokov M. I., Makarov A. V. Nazemnoe lazernoe skanirovanie v obsledovanii mostovykh sooruzheniy [Terrestrial Laser Scanning in Bridge Inspection], *Vestnik mostostroeniya [Bridge Engineering Bulletin]*, 2022, no. 1 (95), pp. 28–35. (In Russian)
9. RD-102-011-OAO “RZhD”. Rukovodstvo po geodezicheskomu kontrolyu i ispolnitel'noy s'yomke pri stroitel'stve i rekonstruktsii iskusstvennykh sooruzheniy s primeneniem NLS [Guidelines for Geodetic

Control and As-Built Surveying During Construction and Reconstruction of Artificial Structures Using TLS], *OAO "RZhD" [JSC Russian Railways Publ.]*, Moscow, 2021, 65 p. (In Russian)

10. Tsifrovaya zheleznaya doroga: kontsepsiya i puti realizatsii [Digital Railway: Concept and Implementation Paths], Moscow, *OAO "RZhD" [JSC Russian Railways Publ.]*, 2020, 80 p. (In Russian)

11. Ivanov V. N., Petrov E. A. Geoinformatsionnye sistemy v transportnom stroitel'stve [Geoinformation Systems in Transport Construction], Saint Petersburg, *PGUPS [Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]*, 2021, 218 p. (In Russian)

12. Smirnov A. V. Sovremennye metody geodezicheskogo monitoringa transportnykh sooruzheniy [Modern Methods of Geodetic Monitoring of Transport Structures], *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"yomka [Proceedings of Universities. Geodesy and Aerial Photography]*, 2021, no. 4, pp. 55–62. (In Russian)

13. Petrov I. S., Sokolov N. V. Avtomatizatsiya obrabotki dannykh lazernogo skanirovaniya v zadachakh diagnostiki puti [Automation of Laser Scanning Data Processing in Track Diagnostics], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communication, Informatics]*, 2022, no. 6, pp. 24–29. (In Russian)

14. Kuznetsov D. M. Integratsiya raznorodnykh geoprostranstvennykh dannykh dlya sozdaniya tsifrovyykh modeley zheleznykh dorog [Integration of Heterogeneous Geospatial Data for Digital Railway Models], *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 2023, no. 2, pp. 38–45. (In Russian)

Received: February 20, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Fedor V. CHESNOVICH — Postgraduate Student of the Department "Surveys and Railway Design"; fedorkocmoc@gmail.com

УДК 625.032.3

Теоретическое описание процессов и связей в поглощающих аппаратах тяговых агрегатов

Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси, И. А. Яицков

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

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л., Риполь-Сарагоси Л. Ф., Яицков И. А. Теоретическое описание процессов и связей в поглощающих аппаратах тяговых агрегатов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 2. С. 309–314. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-309-314

Аннотация

В данной работе аналитически рассмотрены и приведены расчетные зависимости межвагонных усилий от относительного перемещения смежных думпкаргов. **Цель:** теоретическое моделирование процессов, возникающих в поглощающих аппаратах моторных думпкаргов. **Методы:** аналитический метод моделирования функционирования поглощающих аппаратов различных марок в режимах набегания и растягивания. **Практическая значимость:** приведены результаты расчетов предлагаемых поглощающих аппаратов для практического использования в автосцепных устройствах моторных думпкаргов.

Ключевые слова: аналитическая модель, поглощающий аппарат, деформация

Продольно-динамические реакции, возникающие в поглощающем аппарате

Зависимость, учитывающая силу T_i , деформацию $(S_i - S_{i+1})$ наравне со скоростью деформации $(V_i - V_{i+1})$ автосцепок, принято использовать при описании состояния связей автосцепок в моторных думпкарах. Для встречающихся в практике связей уравнение состояния представляют в виде:

$$T_i = T_{yi}(S_i - S_{i+1}) + T_{bi}(V_i - V_{i+1}),$$

где T_{yi} , T_{bi} — соответственно упругая и вязкая составляющие силы.

При аналитическом моделировании необходимо учесть кусочно-линейные характеристики пружинно-фрикционных автосцепок Ш-1-ТМ и Ш-2-Т. Вязкие свойства системы учитываются только в зоне анкилозиса, когда амортизатор не работает и деформируются конструкция вагона и груз.

Зависимость усилия от относительного перемещения смежных вагонов, имеющих аппараты с кусочно-линейными характеристиками, изображена на рис. 1 [3, 4]. Аналитическое описание зависимости следующее:

$$T_i = \begin{cases} 0, & |y_i| \leq z_{1i}; \\ \operatorname{sgn}(y_i) [c_{ki}(|y_i| - z_{1i})] + \beta_i \dot{y}_i; & z_{1i} < |y_i| \leq z_{2i}; \\ \operatorname{sgn}(y_i) [c_{ni}(|y_i| - z_{2i}) + T_{0i}]; & z_{2i} < |y_i| \leq z_{2i} + \lambda_i; \\ \operatorname{sgn}(y_i) [c_{ki}(|y_i| - z_{2i} - \lambda_i) + T_{n1}] + \beta_i \dot{y}_i; & z_{2i} + \lambda_i < |y_i|; \\ \operatorname{sgn}(y_i) [c_{pi}(|y_i| - z_{2i}) + T_{0i}]; & z_{2i} < |y_i| \leq z_{2i} + \lambda_i; \end{cases}$$

$$z_{1i} < |y_i| \leq z_{2i};$$

$$z_{2i} < |y_i| \leq z_{2i} + \lambda_i;$$

$$z_{2i} + \lambda_i < |y_i|;$$

$$z_{2i} < |y_i| \leq z_{2i} + \lambda_i;$$

где c_{ni} — жесткость при нагрузке;
 c_{pi} — жесткость при разгрузке;
 c_{ki} — жесткость конструкции экипажа и груза;
 z_{1i} — половина зазора между автосцепными устройствами;
 λ_i — общее значение полного сжатия двух последовательно работающих автосцепок;
 $(z_{2i} - z_{1i})$ — величина сжатия конструкции, при которой преодолевается начальное сопротивление поглощающих аппаратов T_{0i} ;
 β — коэффициент вязкости конструкции и груза;
 $y_i = (S_i - S_{i+1})$ — относительное перемещение вагонов;
 $\dot{y}_i = (V_i - V_{i+1})$ — относительные скорости смежных вагонов;
 $\text{sgn}(y_i)$ — функция знака;
 T_{ni} — сила сопротивления аппаратов при полном сжатии.

При переходе от характеристик нагрузки к характеристике разгрузки и наоборот используются следующие зависимости:

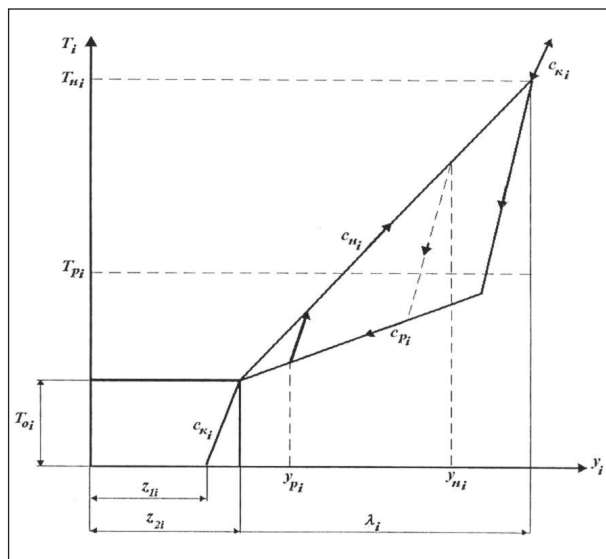


Рис. 1. Расчетная зависимость межвагонного усилия от относительного перемещения смежных вагонов

$$T_i = \begin{cases} \text{sgn}(y_i) [c_{ki}(|y_i| - y_{ni}) + c_{ni}(y_{ni} - z_{2i}) + T_{0i}] + \beta_i \dot{y}_i; \\ |c_{pi}(|y_i| - z_{2i})| \leq |c_{ki}(|y_i| - y_{ni}) + c_{ni}(y_{ni} - z_{2i})|; \\ \text{sgn}(y_i) [c_{ki}(|y_i| - y_{pi}) + c_{pi}(y_{pi} - z_{2i}) + T_{0i}] + \beta_i \dot{y}_i; \\ |c_{ni}(|y_i| - z_{2i})| > |c_{ki}(|y_i| - y_{pi}) + c_{pi}(y_{pi} - z_{2i})|; \end{cases}$$

где y_{ni} , y_{pi} — общая величина сжатия автосцепок при смене режимов «нагрузка — разгрузка».

Расчет поглощающих аппаратов

На тяговом агрегате установлены поглощающие аппараты Ш-2-Т, на думпкарах — аппараты Ш-1-ТМ.

Согласно [5–7], характеристики этих аппаратов следующие:

1. Поглощающий аппарат Ш-2-Т. Полный ход — 110 мм, при котором сила сопротивления аппарата — 250 тс, после приработки энергоемкость составляет 5,5 тс·м. Пружины предварительно сжаты усилием 4,2 тс. Начальное сопротивление аппарата около 26 тс.

2. Поглощающий аппарат Ш-1-ТМ. Полный ход — 70 мм, энергоемкость составляет 5 тс·м при усилии 280 тс, соответствующем полному ходу. Средняя энергоемкость аппарата при силе 200 тс составляет 3,4 тс·м. Пружины сжаты усилием 4,6 тс. Начальное сопротивление аппарата — около 23 тс. Эти данные позволяют назначить расчетные параметры межвагонной связи, состоящей из двух последовательно работающих поглощающих аппаратов [8, 9].

3. Поглощающий аппарат Ш-2-Т. Так как $T_0 = 60$ кН, $T_n = 2500$ кН, $\lambda = 0,22$ м, то c_n подсчитываем по формуле:

$$c_n = \frac{T_n - T_0}{\lambda}; c_n = \frac{2500 - 260}{0,22} = 10000 \text{ кН/м.}$$

Жесткость двух последовательно соединенных поглощающих аппаратов при их разгрузке можно определить по формуле:

$$c_p = \frac{T_p - T_0}{\lambda}; \quad c_p = \frac{480 - 260}{0,22} = 1000 \text{ кН/м.}$$

Величина $T_p = 480$ кН взята по теоретическим диаграммам работы поглощающих аппаратов.

Из рис. 1 также следует, что:

$$z_2 - z_1 = \frac{T_0}{c_k};$$

$$z_2 - z_1 = \frac{260}{5 \cdot 10^5} = 5,2 \cdot 10^{-4} = 0,00052 \text{ м.}$$

Принимаем $c_n = 10\,000$ кН/м = 10^4 кН/м; $c_p = 1000$ кН/м; $\lambda = 0,22$ м; $z_2 - z_1 = 0,00052$ м; $\beta = 1000$ кН·с/м.

4. Поглощающий аппарат Ш-1-ТМ. Преодолев расчеты, аналогичные предыдущим, принимаем $c_n = 23\,000$ кН/м; $c_p = 1500$ кН/м; $\lambda = 0,14$ мм; $z_2 - z_1 = 0,00046$ м; $\beta = 1000$ кН·с/м.

Жесткость конструкции c_{ki} в основном определяется жесткостью хребтовой балки. Хребтовая балка вагона модели 33-678 представляет собой два сваренных двутавра №55 по ГОСТ 8239-56, сталь 09Г2, ГОСТ 535-58 с наваренными сверху и снизу листами сечением $0,45 \times 0,012$ м из той же стали. Длина хребтовой балки — 13,8 м.

За поперечное сечение хребтовой балки принимаем ее сечение в средней части (рис. 2) [10].

Жесткость бруса на сжатие определяется по формуле:

$$c = \frac{F \cdot E}{l} \text{ кН/м,}$$

где E — модуль упругости материала бруса, кН/м²;

F — площадь поперечного сечения бруса, м²;

l — длина бруса, м.

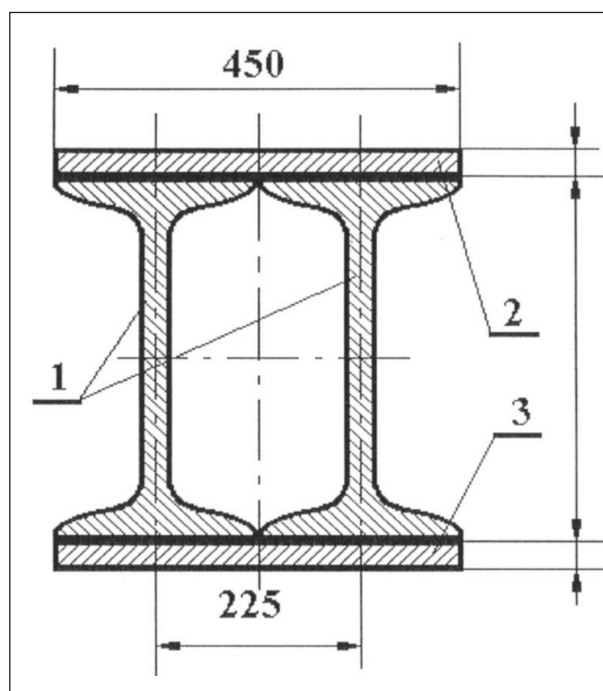


Рис. 2. Поперечное сечение хребтовой балки думпкара 33-678 в средней части (к расчету жесткости конструкции вагона): 1 — двутавр №55 по ГОСТ 8239-56; 2 — верхний лист, сталь 09Г2; 3 — нижний лист, сталь 09Г2

Для стали 09Г2 модуль упругости — $E = 2 \cdot 10^8$ кН/м². Площадь поперечного сечения F складывается из площади поперечного сечения двутавров $F_{дв} = 114 \cdot 10^{-4}$ м² и верхнего и нижнего наварных листов $F_{л}$ [11]:

$$F_{л} = 0,012 \cdot 0,45 = 54 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$F = 2F_{дв} + 2F_{л} = 2(114 + 54) \cdot 10^{-4} = 336 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Подсчитываем жесткость хребтовой балки:

$$c = \frac{2 \cdot 10^8 \cdot 336 \cdot 10^{-4}}{13,8} = 4,87 \cdot 10^5 \text{ кН/м.}$$

Учитывая, что жесткость конструкции в основном определяется жесткостью хребтовой балки, принимаем для всех экипажей карьерного поезда $c_{ki} = 5 \cdot 10^5$ кН/м.

Заключение

1. Определена и показана расчетная зависимость межвагонного усилия от относительного перемещения смежных вагонов.

2. Определена и обоснована жесткость хребтовой балки исходя из условий неразрывности для моторного думпкара.

3. Определено, что жесткость конструкции в основном определяется жесткостью хребтовой балки, и приведено ее расчетное значение.

Список источников

1. Риполь-Сарагоси Л. Ф., Риполь-Сарагоси Т. Л., Яицков И. А. Анализ предпосылок создания математической модели функционирования автосцепок груженых тяговых агрегатов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 4. С. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908. EDN DWWMWJ

2. Риполь-Сарагоси Л. Ф., Риполь-Сарагоси Т. Л., Яицков И. А. Математическое моделирование внешних сил в режимах тяги и торможения, действующих на тяговый агрегат // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, № 3. С. 625–631. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-625-630

3. Правила тяговых расчетов для поездной работы промышленных электровозов и тяговых агрегатов переменного тока. 2-е изд. Вып. 4323. М.: ПромтрансНИИпроект, 1977. 78 с.

4. Правила тяговых расчетов для тепловозов на промышленном транспорте. 2-е изд. Вып. 4324. М.: ПромтрансНИИпроект, 1977. 78 с.

5. Кравчук В. В., Доронина И. И., Харин Е. А. Повышение безопасности движения поездов повышенной массы и длины. Хабаровск: ДВГУПС, 2005.

6. Гребенюк П. Т. Сопротивление движению подвижного состава в S-образных кривых // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 1.

7. Потапов М. Г. Карьерный транспорт. М.: Недра, 1985.

8. Электромагнитный рельсовый тормоз: патент № RU 2361761 С1 Российская Федерация. МПК В61Н7/08: 2008104744/11 / Балон Л. В., Соломин В. А., Риполь-Сарагоси Л. Ф.; заявл. 07.02.2008; опубл. 20.07.2009.

9. Риполь-Сарагоси Т. Л., Риполь-Сарагоси Л. Ф. Исследование влияния температурного режима катушки на время включения электромагнитного рельсового тормоза (ЭМРТ) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (87). С. 35–43.

10. Kitanov S., Podolskiy A. Analysis of Eddy-Current and Magnetic Rail Brakes for High-Speed Trains // The Open Transportation Journal. 2008. No. 2. Pp. 19–28.

11. Автосцепка СА-3Т для вагонов тяжеловесного движения: особенности конструкции и технологии изготовления / Р. А. Савушкин [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. 2018. № 1 (53). С. 30–32.

12. Ромен Ю. С., Мугинштейн Л. А., Неверова Л. И. Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 3 (46). С. 64–68.

Дата поступления: 01.03.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Информация об авторах:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — доктор техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте»; rpol-saragosi@mail.ru

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Леонид Францискович — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; el.siete.07@mail.ru

ЯИЦКОВ Иван Анатольевич — доктор техн. наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; yia@rgups.ru

Theoretical Description of Processes and Relationships in the Absorbing Devices of Traction Units

T.L. Ripol'-Saragosi, L.F. Ripol'-Saragosi, I.A. Yaitskov

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

For citation: Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F., Yaitskov I. A. Theoretical Description of Processes and Relationships in the Absorbing Devices of Traction Units // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 309–314. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-309-314 (In Russian)

Abstract

This paper provides an analytical analysis and calculations of the intercar forces as a function of the relative displacement of adjacent dump cars. **Objective:** theoretical modeling of processes occurring in the draft gear of motor dump cars. **Methods:** an analytical method for modeling the operation of draft gear of various brands in running and stretching modes. **Practical Relevance:** the paper presents the calculation results for the proposed draft gear for practical use in the automatic coupling devices of motor dump cars.

Keywords: analytical model, draft gear, deformation

References

1. Ripol'-Saragosi L.F., Ripol'-Saragosi T.L., Yaitskov I.A. Analiz predposylok sozdaniya matematicheskoy modeli funktsionirovaniya avtostsepek gruzhenykh tyagovykh agregatov [Analysis of the Prerequisites for Creating a Mathematical Model for the Operation of Automatic Couplers Of Loaded Traction Units], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2024, vol. 21, no. 4, pp. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908, EDN DWWMWJ (In Russian)
2. Ripol'-Saragosi L.F., Ripol'-Saragosi T.L., Yaitskov I. A. Matematicheskoe modelirovanie vneshnikh sil v rezhimakh tyagi i tormozheniya, deystvuyushchikh na tyagovyj agregat [Mathematical Modeling of External Forces in Traction and Braking Modes Acting on a Traction Unit], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2025, vol. 22, no. 3, pp. 625–631. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-625-630 (In Russian)
3. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty promyshlennykh elektrovozov i tyagovykh agregatov peremennogo toka [Rules for Traction Calculations for Train Operation of Industrial Electric Locomotives and AC Traction Units], 2nd ed., iss. 4323, Moscow, *PromtransNIiproekt [Design and Scientific Research Institute of Industrial Transport]*, 1977, 78 p. (In Russian)
4. Pravila tyagovykh raschetov dlya teplovozov na promyshlennom transporte [Rules for Traction Calculations for Diesel Locomotives in Industrial Transport], 2nd ed., iss. 4324, Moscow, *PromtransNIiproekt [Design and Scientific Research Institute of Industrial Transport]*, 1977, 78 p. (In Russian)
5. Kravchuk V.V., Doronina I.I., Kharin E.A. Povyshenie bezopasnosti dvizheniya poezdov povyshennoj massy i dliny [Improving the Safety of Trains of Increased Mass and Length], *Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy universitet putej soobshchenij [Far Eastern State Transport University]*, 2005. (In Russian)
6. Grebenyuk P.T. Soprotivlenie dvizheniyu podvizhnogo sostava v S-obraznykh krivykh [Resistance

- to the Movement Of Rolling Stock in S-Shaped Curves], *Vestnik VNIIZhT [Russian Railway Science Journal]*, no. 1, 1987. (In Russian)
7. Potapov M.G. Kar'ernyj Transport [Quarry transport], Moscow, Nedra, 1985. (In Russian)
8. Patent №RU 2361761 C1 Rossijskaya Federatsiya, MPK B61H7/08 “Elektromagnitnyj rel'sovyj tormoz” [Patent no. RU 2361761 C1 Russian Federation, IPC B61H7/08 “Electromagnetic Rail Brake”], 2008104744/11, declared 07.02.2008, published 20. 07.2009. (In Russian)
9. Ripol'-Saragosi T.L., Ripol'-Saragosi L.F. Issledovanie vliyaniya temperaturnogo rezhima katushki na vremya vklucheniya elektromagnitnogo rel'sovogo tormoza (EMRT) [Study of the Influence of the Temperature Regime of the Coil on the Engagement Time of the Electromagnetic Rail Brake (EMRB)], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]*, no. 3 [87], Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, 2022, pp. 35–43. (In Russian)
10. Kitanov S., Podol'skij A. Analysis of Eddy-Current and Magnetic Rail Brakes for High-Speed Trains, *The Open Transportation Journal*, 2008, no. 2, pp. 19–28.
11. Savushkin R. A., et al. Avtostsepka SA-3T dlya vagonov tyazhelovesnogo dvizheniya: Osobennosti konstruktsii i tekhnologii izgotovleniya [Automatic Coupling Sa-3T For Heavy-Haul Cars: Design Features and Manufacturing Technology], *Vagony i vagonnoe khozyajstvo [Cars and Car Fleet]*, 2018, no. 1 (53), pp. 30–32. (In Russian)
12. Romen Yu. S., Muginshtein L. A., Neverova L. I. Vliyanie prodol'nykh sil v poezdakh na opasnost' skhoda vagonov v zavisimosti ot ikh zagruzki [The Influence of Longitudinal Forces in Trains on the Risk of Derailment of Cars Depending on Their Load], *Transport Rossijskoj Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2013, no. 3 (46), pp. 64–68. (In Russian)

Received: March 01, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Tat'yana L. RIPOL'-SARAGOSI — Dr. Sci.

in Engineering, Professor, Professor of the Department “Thermal Power Engineering in Railway Transport”;

ripol-saragosi@mail.ru

Leonid F. RIPOL'-SARAGOSI — Ph.D. in

Engineering, Associate Professor of the Department “Cars and Carriage Maintenance”;

el.siete.07@mail.ru

Ivan A. YAITSKOV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor of the Department “Cars and Carriage Maintenance”; yia@rgups.ru

УДК 629.01:629.03

Диагностика узлов тяговых электрических двигателей скоростных поездов типа Push-Pull на сети железных дорог России

И. С. Пономарев¹, М. Ю. Обухов², Д. А. Елин¹, А. М. Евстафьев¹

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

²Дирекция тяги — филиал ОАО «РЖД», Россия, 105064, Москва, Басманный тупик, д. 6, лит. А, стр. 4

Для цитирования: Пономарев И. С., Обухов М. Ю., Елин Д. А., Евстафьев А. М. Диагностика узлов тяговых электрических двигателей скоростных поездов типа Push-Pull на сети железных дорог России // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 315–325. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-315-325

Аннотация

Цель исследования: разработка и обоснование методики оперативной оценки технического состояния тягового двигателя и критических узлов, что является фундаментом для перехода от традиционного планово-предупредительного ремонта к современному диагностическому обслуживанию. Это позволяет перейти от регламентных интервалов к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования. В рамках работы была создана комплексная имитационная модель на базе MATLAB для двигателя электровоза ЭП21 — ДТА-1200А, используемого в поездах Push-Pull. Модель реализует ключевые **методы** диагностики: вибрационный анализ для выявления механических дефектов (в частности, подшипников серии SKF), тепловой контроль для предотвращения перегрева и анализ гармоник тока статора для раннего обнаружения электрических неисправностей. Для демонстрации работы системы в модель заложен сценарий с имитацией дефекта внешнего кольца подшипника, характеризующийся ростом амплитуды вибрации на характерной частоте ВРФО. Основным **результатом** является предложенная архитектура интегрированной диагностической системы, включающая уровни сбора данных, обработки сигналов, аналитики и формирования решений. Алгоритм на основе взвешенных индексов выдает конкретные рекомендации от продолжения эксплуатации до немедленной остановки. **Практическая значимость** работы заключается в том, что внедрение такой методики на сети железных дорог России позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации скоростного подвижного состава, снизить затраты на внеплановые ремонты и оптимизировать логистику технического обслуживания, переведя его на предиктивную (прогнозную) основу.

Ключевые слова: диагностика, скоростной поезд, Push-Pull, пуш-пул, двигательная установка, узлы двигателя, мониторинг

Введение

В настоящий момент на сети железных дорог России внедряются скоростные поезда с возможностью эксплуатации по технологии Push-Pull (управление тягой и торможением с обеих сторон), что предъявляет повышенные требования к надежности тяговых электрических двигателей, их узлов и систем привода

(особенно на неэлектрифицированных линиях или гибридных системах) [1, 2].

Традиционные планово-предупредительные ремонты не позволяют эффективно учитывать реальные фактические изменения состояния узлов, что ведет либо к излишним затратам при обслуживании и эксплуатации, либо к отказам. Диагностика состояния узлов в режиме

эксплуатации (онлайн/периодический мониторинг) становится ключевым элементом повышения безопасности и экономичности.

Конструктивные особенности и условия эксплуатации двигательной установки поездов Push-Pull и узлов для диагностики

Локомотивы поездов по технологии Push-Pull управляются с обоих концов состава [3, 4], что позволяет избежать маневровой работы и смены локомотива. Такой режим требует, чтобы двигательные установки на обоих концах подвижного состава находились в синхронизированном состоянии, так как любая дисбалансная нагрузка может привести к повышенным динамическим нагрузкам на узлы.

В таблице указан перечень наиболее критичных узлов, на которые стоит обратить внимание при проведении диагностики.

Климатические условия (низкие температуры, перепады температур) влияют на параметры изоляции, смазки и тепловые нагрузки.

Железнодорожная сеть России включает большое число участков с разной электрификацией (в контексте подразумеваются участки с постоянным и переменным токами в контактной сети), в том числе неэлектрифицированных линий, что может обуславливать наличие дизель-генераторных систем или гибридных приводов.

Расстояния, длительность эксплуатации, значительная изношенность инфраструктуры

накладывают дополнительные требования на надежность и возможность диагностики.

Методы диагностики узлов двигательной установки

При эксплуатации электродвигателей возникают различные неисправности, которые могут остановить работу подвижного состава и привести к запрету дальнейшей эксплуатации [5–8]. Поэтому необходимо оперативно выявлять причину неисправности и устранять ее как можно быстрее.

При эксплуатации асинхронных двигателей возникают отклонения от номинальных значений параметров, вызванные технологическими погрешностями в производстве, неправильным режимом эксплуатации или износом. Повреждения подшипников и элементов статора являются наиболее частыми неисправностями в асинхронных двигателях

К диагностическим методам относятся мониторинг вибрации, акустика, тепловой контроль, электрические методы, обработка сигналов, модели на основе машинного обучения. Классификация видов диагностики узлов тягового двигателя показана на рис. 1.

Методика технической диагностики локомотивного оборудования показывает, что часто диагностика осуществляется на стационарных стендах, но применение корреляционных методов возможно и в эксплуатации.

В российской практике возможно контролировать токи, напряжения, температуру

ТАБЛИЦА. Узлы, их влияние на работу и дефекты

Узел	Влияние на работоспособность	Типичные дефекты
Электродвигатель	Потеря мощности, перегрев	Износ подшипников, пробой изоляции
Редуктор	Рост вибраций, шум	Износ зубьев, смещение осей
Система охлаждения	Перегрев узлов	Отказ вентиляторов, утечки жидкости
Электроника управления	Сбой системы	Перегрузки, нарушение связи



Рис. 1. Методы диагностики

обмоток, вибрацию корпуса двигателя, что позволяет выявлять аномалии работы установки на ранней стадии.

С развитием машинного обучения и гибридных подходов возможно сочетание классического анализа и методов машинного обучения для более точной диагностики.

Вибрационная диагностика — это один из наиболее распространенных методов: измерение ускорений, спектральный анализ, выделение характерных частот дефектов (например, износ зубьев, дисбаланс, люфт, дефекты подшипников).

Акустические методы и ультразвуковая диагностика могут дополнять вибрационный анализ, особенно в труднодоступных узлах.

Измерение температуры обмоток, корпуса, смазочной системы — один из простых, но эффективных методов раннего обнаружения перегрева. Инфракрасная термография позволяет визуализировать распределение тепловых полей и выявлять горячие точки, перегревы соединений, дефекты теплоотвода.

В последнее время набирают популярность метод машинного обучения и применение так

называемых цифровых двойников в железнодорожной отрасли.

Предлагаемая архитектура диагностической системы узлов двигательной установки Push-Pull

Предлагаемая архитектура диагностической системы (рис. 2) для узлов двигательной установки типа Push-Pull представляет собой многоуровневую структуру, объединяющую аппаратные и программные компоненты для непрерывного мониторинга и анализа состояния оборудования.

В основе системы лежит последовательная цепочка обработки данных, начинающаяся с физического уровня сенсоров. На этом этапе задействованы различные измерительные устройства: от акселерометров и температурных датчиков до ультразвуковых детекторов и инфракрасных камер. Они могут быть как стационарными, так и портативными, обеспечивая сбор первичных данных о работе узлов. Собранная информация передается по специализированной сети, которая может включать промышленные интерфейсы типа CAN,



Рис. 2. Архитектура диагностического контроля

Ethernet или беспроводные каналы. При этом критически важны помехоустойчивость и защита данных.

На следующем этапе происходит первичная обработка информации: фильтрация, выравнивание сигналов, удаление шумов и математические преобразования, такие как быстрое преобразование Фурье (FFT) или вейвлет-анализ. После предобработки данные поступают в аналитический модуль, где применяются разнообразные алгоритмы: от простого сравнения с эталонными кривыми до сложных моделей машинного обучения. Здесь же работают детекторы аномалий и классификаторы, выявляющие отклонения от нормы. Итоговые результаты визуализируются в удобной форме: на диагностических панелях отображаются отчеты и рекомендации по обслуживанию, позволяя оперативно принимать решения.

Для эффективной диагностики каждый узел требует индивидуального набора контролируемых параметров. Анализ осуществляется с помощью пороговых методов, сравнительного анализа с базовым эталоном, статистических инструментов (среднее значение, стандартное отклонение, корреляция) и алгоритмов машинного обучения. Особое значение имеет этап обучения моделей, для которого необходим массив исторических данных — как при штатном функционировании, так и при наличии дефектов. Перспективным решением выглядит гибридный подход, сочетающий физическую модель поведения узла с коррекционным слоем на основе машинного обучения.

При внедрении системы на железных дорогах России необходимо учитывать специфику

эксплуатации: ограниченные ресурсы по энергопотреблению и передаче данных, а также особенности размещения оборудования. Датчики целесообразно устанавливать в наиболее критичных узлах, а передачу данных организовывать периодически, например во время стоянок. Оптимальной может стать каскадная архитектура, при которой первичная диагностика выполняется непосредственно на борту подвижного состава, а углубленный анализ — в удаленном центре обработки.

Среди ключевых преимуществ предложенного подхода является возможность раннего выявления усталости узлов без вывода подвижного состава из эксплуатации, снижение затрат на ремонты и повышение безопасности движения. Система также отличается гибкостью: алгоритмы можно адаптировать под конкретные типы поездов и участки пути. Однако существуют и ограничения: необходимость использования высокоточных сенсоров, требования к объему обучающих данных (особенно примеров с дефектами), а также влияние внешних факторов (шумы, температурные колебания, состояние пути) на достоверность результатов. Дополнительные сложности связаны с размещением датчиков и доступом к узлам для их монтажа.

Применение машинного обучения и статистических данных в условиях диагностики асинхронного тягового электродвигателя

В рамках проведения исследования было произведено математическое моделирование асинхронного тягового двигателя ДТА-1200А

и показан пример применения методики диагностирования с экспериментальными данными, на основании которых сделан комплексный анализ.

При построении имитационной модели использовались номинальные параметры тягового электродвигателя ДТА-1200А: мощность на валу 1200 кВт, линейное напряжение 2183 В, номинальный ток 380 А, частота питающего напряжения 58,9 Гц, частота вращения 1766 об./мин., номинальный момент 6489 Н·м. Частота вращения ротора, используемая в расчетах, составила 29,43 Гц.

Для моделирования подшипникового узла принят подшипник типа SKF. В расчетах использовались следующие геометрические параметры: число тел качения равно 8, диаметр тела качения составляет 34 мм, диаметр делительной окружности — 157,5 мм. На основе указанных параметров определены характерные частоты дефектов подшипника: частота прохождения тел качения по наружному кольцу, по внутреннему кольцу, частота вращения сепаратора и частота вращения тела качения.

Частота дискретизации сигналов в модели принята равной 10 000 Гц, длительность моделирования составила 2 с. В качестве диагностируемого сценария задан дефект внешнего кольца подшипника, моделируемый увеличением амплитуды вибрации на частоте и ее гармониках. Дополнительно в сигналы введена случайная составляющая, имитирующая эксплуатационные шумы и помехи.

Код моделирования, составленный для этих целей, предназначен для комплексной диагностики тягового двигателя секции перспективного скоростного пассажирского электровоза серии 2ЭП21 типа ДТА-1200А, который используется в поездах, работающих по технологии Push-Pull. Основной целью моделирования является создание системы мо-

нитинга и раннего обнаружения дефектов двигателя без вывода состава из эксплуатации. Код решает задачи вибрационной диагностики, теплового контроля и анализа электрических параметров в реальном времени. Результаты моделирования на основе машинного обучения, статистики и прогнозируемых результатов показаны на рис. 3.

Кинематические частоты элементов подшипника определяются на основе его геометрических параметров: числа тел качения (z), диаметра тела качения (d), делительного диаметра дорожек качения (D), а также частоты вращения ротора ($f = n/60$). Частота прохождения тел качения через точку наружной дорожки (BPFO) рассчитывается по зависимости:

$$f_{BPFO} = \frac{z}{2} fr \left(1 - \frac{d}{D} \right),$$

которая выводится из кинематической связи между относительным перемещением тел качения и неподвижным наружным кольцом. Частота дефекта внутренней дорожки (BPFI) определяется аналогично, с учетом вращения внутреннего кольца вместе с валом:

$$f_{BPFI} = \frac{z}{2} fr \left(1 - \frac{d}{D} \right).$$

Частота вращения тела качения вокруг собственной оси (BSF) выражается формулой:

$$f_{BSF} = \frac{D}{2d} fr \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right),$$

которая следует из условий чистого качения между внутренней и наружной дорожками. Частота вращения сепаратора (FTF) определяется выражением:

$$f_{FTF} = \frac{1}{2} fr \left(1 - \frac{d}{D} \right),$$

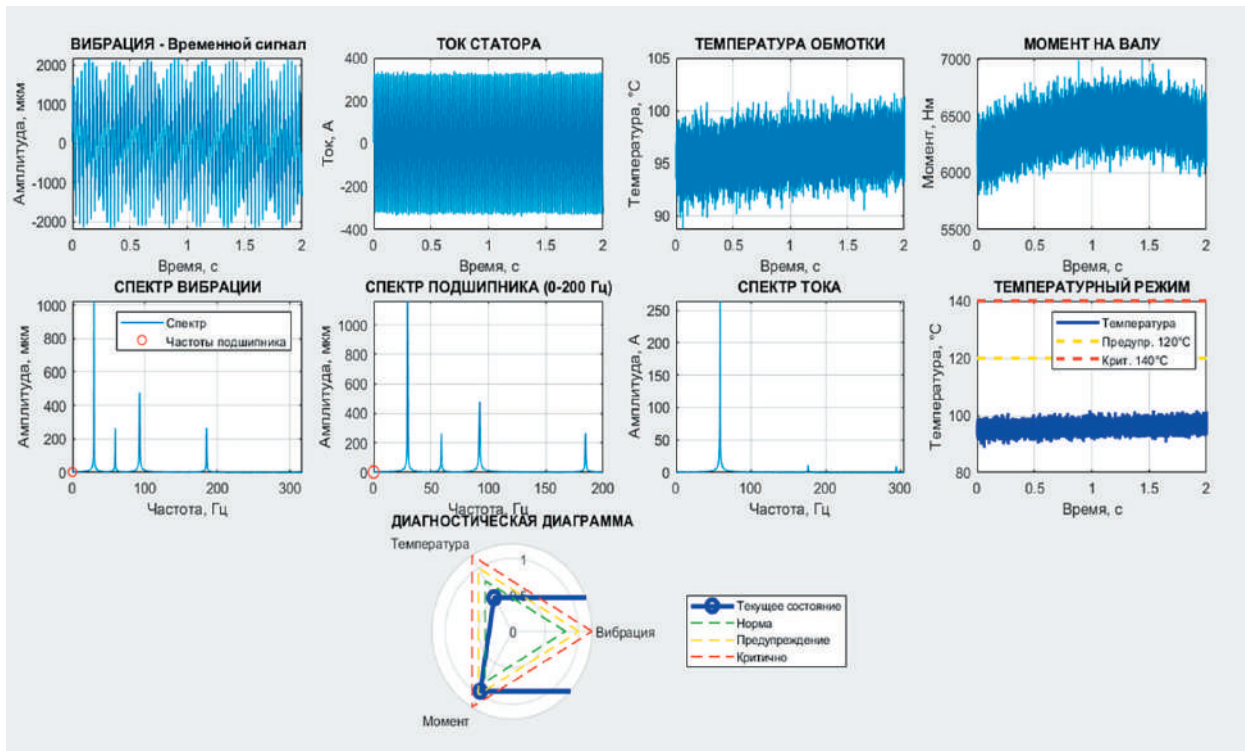


Рис. 3. Результаты моделирования

вытекающим из соотношений скоростей вращения кольца и элементов удерживающего устройства подшипника.

Для анализа вибрационного состояния двигателя формируется модельный вибросигнал, представляющий собой суперпозицию гармонических составляющих, соответствующих частоте вращения ротора, ее гармоникам, а также характерным частотам подшипников. Такое разложение основано на теореме Фурье, согласно которой любой периодический процесс может быть представлен в виде суммы синусоидальных компонент с различной частотой и амплитудой. Ток статора моделируется как совокупность основной гармоники питающей частоты и высших гармоник, отражающих электромагнитные неравномерности. Температура и момент задаются как квазистационарные процессы с низкочастотным колебательным компонентом.

Для частотного анализа вибросигнала применяется дискретное преобразование Фурье:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j 2\pi \frac{kn}{N}},$$

где $x[n]$ — дискретный сигнал, (N) — число отсчетов.

Амплитудный спектр определяется по модулю преобразования и нормируется на длину выборки. Односторонний спектр формируется с учетом того, что для вещественных сигналов положительные и отрицательные частоты имеют одинаковую амплитуду.

В процессе анализа вычисляются статистические характеристики вибрации. Среднеквадратическое значение определяется зависимостью:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x_i^2},$$

являющейся энергетически эквивалентной оценкой уровня вибрации. Пиковое значение рассчитывается как

$$x_{\text{peak}} = \max |x(t)|,$$

а фактор амплитуды определяется отношением

$$CF = \frac{x_{\text{peak}}}{x_{RMS}},$$

что позволяет выявлять наличие ударных процессов в механической системе. Коэффициент эксцесса рассчитывается по четвертому моменту распределения и отражает степень отклонения вибрационного сигнала от нормального распределения.

Для оценки механической нагрузки анализируются колебания момента, которые вычисляются по формуле:

$$\Delta M = \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{\bar{M}} \cdot 100\%.$$

Температурный режим анализируется на основании сравнения средней температуры обмоток с установленными пороговыми значениями предупреждения и перегрева.

Каждый диагностический показатель нормируется на соответствующее граничное значение. Индекс вибрации определяется как максимальное значение из отношения RMS , амплитуды характерных частот и фактора амплитуды к их допускаемым уровням:

$$I_{\text{vib}} = \max \left(\frac{\text{frac} x_{RMS}}{x_{\text{лим}}}, \frac{\text{frac} BPF0}{A_{BPF0, \text{лим}}}, \frac{\text{frac} CF}{CF_{\text{лим}}} \right).$$

Температурный индекс имеет вид:

$$I_{\text{temp}} = \frac{\bar{T}}{T_{\text{пред}}},$$

а индекс механической нагрузки определяется выражением:

$$I_{\text{torque}} = \frac{\Delta M}{\Delta M_{\text{лим}}}.$$

Общий диагностический индекс представляет собой взвешенную сумму нормированных индексов:

$$I_{\text{tot}} = w_1 I_{\text{vib}} + w_2 I_{\text{temp}} + w_3 I_{\text{torque}},$$

где (w_1) , (w_2) , (w_3) — коэффициенты, характеризующие значимость каждого диагностического направления. Значение интегрального индекса используется для классификации технического состояния двигателя по установленным порогам: нормальное, предупреждающее, предаварийное и аварийное.

Интерпретация результатов

моделирования и визуализации

Разработанный программный код в среде MATLAB реализует комплексную модель диагностического анализа тягового двигателя электровоза ЭП21 ДТА-1200А на основе синтезированных сигналов вибрации, тока, температуры и электромагнитного момента. Моделирование направлено на демонстрацию принципов выявления дефектов подшипников и оценки общего технического состояния двигателя.

На первом этапе формируются временные реализации диагностических сигналов. График вибрации отражает наличие периодических составляющих, обусловленных частотой вращения ротора и характерными частотами дефекта подшипника, что моделирует повреждение внешнего кольца. Временные диаграммы тока, температуры и момента используются для оценки электромагнитных и тепловых режимов работы двигателя.

Спектр вибрационного сигнала, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье, позволяет выявить пики на характерных частотах подшипника (BPFO, BPFI, BSF, FTF). Наличие выраженных амплитуд на этих

частотах служит диагностическим признаком дефектов элементов подшипникового узла. Увеличенный фрагмент спектра в диапазоне низких частот обеспечивает более точную визуализацию данных гармоник.

Дополнительно вычисляются количественные диагностические признаки вибрации: среднеквадратичное значение, пиковая амплитуда, фактор амплитуды и эксцесс. Превышение ими установленных пороговых значений используется для автоматической классификации состояния подшипника.

Спектральный анализ тока статора позволяет выявлять косвенные признаки механических дефектов, проявляющиеся в изменении гармонического состава электрического сигнала. Температурный график с нанесенными порогами предупреждения и аварийного состояния демонстрирует возможность тепловой диагностики двигателя в динамике.

Итоговая полярная диагностическая диаграмма представляет собой интегральную визуализацию нормированных индексов вибрационного, теплового и моментного состояния. Расположение кривой относительно зон «норма», «предупреждение» и «критично» позволяет наглядно оценить текущее техническое состояние двигателя и принять обоснованное решение о необходимости обслуживания или ремонта.

Таким образом, представленная программная реализация демонстрирует возможность комплексной диагностики тягового двигателя с использованием методов вибрационного, электрического и теплового анализа и может служить основой для разработки систем интеллектуального мониторинга подвижного состава.

Результаты анализа визуализируются в виде полярной диаграммы, отражающей относительный вклад каждого диагностического

показателя, и сохраняются в виде отчетного файла. Реализованная математическая модель обеспечивает комплексную оценку состояния тягового двигателя и может применяться в системах технического диагностирования и мониторинга его работы.

Код открывает возможности перехода от планово-предупредительного ремонта к диагностическому обслуживанию, что значительно повышает безопасность эксплуатации и снижает затраты на содержание подвижного состава.

Заключение

Переход к диагностическому (условно-техническому) обслуживанию двигательных узлов поездов Push-Pull позволяет повысить безопасность, снизить внеплановые ремонты и оптимизировать эксплуатационные расходы. Для практической реализации важны накопление достоверных данных, адаптация алгоритмов под эксплуатационные условия и интеграция с системами управления железнодорожным движением.

Список источников

1. Об основных направлениях развития экологически чистого тягового подвижного состава / М.Ю. Обухов [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. 2021. № 2. С. 32–35.
2. Обухов М.Ю., Чикиркин О.В., Елин Д.А. Развитие железнодорожных пассажирских перевозок за счет применения технологии Push-Pull // Локомотив. 2025. № 4. С. 2–5.
3. Обухов М.Ю., Чикиркин О.В., Елин Д.А. Технология Push-Pull для России: актуальные решения // Вестник Института проблем естественных монополий: техника железных дорог. 2025. №2 (70). С. 30–35.
4. Зеленченко А.П., Федоров Д.В. Диагностические комплексы электрического подвижного состава.

М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 112 с.

5. Воробьев А.А., Горский Л.В. Оптимизация системы ремонта локомотивов, М.: Транспорт, 1994. 208 с.

6. Гиоев З.Г. Основы виброакустической диагностики электромеханических систем локомотивов: монография. Владикавказ: РУХС, 2007. 278 с.

7. Сапожников В.В. Основы технической диагностики: учебное пособие для студентов вузов ж. д. транспорта. М.: Маршрут, 2004. 318 с.

8. Лепихова В.А., Ляшенко Н.В. Алгоритмизация для виброакустической диагностики механических узлов тяговых двигателей // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2023. № 2 (218). С. 112–115.

9. Безбородов, Ю.Я., Серегин В.А., Харламов В. В. Виброакустическая диагностика дефектов подшипникового узла тяговых двигателей // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных машин постоянного тока (Омск, 01–04 июня 1993 года). Омск: Омский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1993. С. 88–89.

10. Пономарев И.С., Зеленченко А.П., Евстафьев А.М. Развитие методов диагностики асинхронного тягового электропривода, применяемого на высокоскоростном подвижном составе // II Международная научная конференция «Железная дорога: путь в будущее»: сборник материалов аспирантов и молодых ученых к 80-летию аспирантуры и научного центра «Экономика комплексных проектов и тарифообразования» АО «ВНИИЖТ» (Москва, 18 апреля 2024 г.). М.: Инфра-М, 2024. С. 128–133.

Дата поступления: 13.03.2026

Решение о публикации: 01.05.2026

Контактная информация:

ПОНОМАРЕВ Илья Сергеевич — аспирант, ведущий инженер; iliy-ponomarev@mail.ru

ОБУХОВ Михаил Юрьевич — начальник отдела новой техники Технической службы;

ObuhovMY@center.rzd.ru

ЕЛИН Дмитрий Александрович — аспирант, инженер; i@dimaelin.ru

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрическая тяга»; elt@pgups.ru

Diagnostics of Traction Electric Motor Units of High-Speed Push-Pull Trains on the Russian Railway

I. S. Ponomarev¹, M. Yu. Obukhov², D. A. Elin¹, A. M. Evstaf'ev¹

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

²Traction Directorate — branch of JSC Russian Railways, letter A, build. 4, 6 Basmanny tupik, Moscow, 105064, Russia

For citation: Ponomarev I. S., Obukhov M. Yu., Elin D. A., Evstaf'ev A. M. Diagnostics of Traction Electric Motor Units of High-Speed Push-Pull Trains on the Russian Railway // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026, iss. 2, pp. 315–325. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-315-325 (In Russian)

Abstract

The objective of the study is to develop and validate a methodology for quickly assessing the technical condition of a traction motor and critical components, which forms the foundation for the transition from traditional scheduled preventive maintenance to modern predictive maintenance. This enables a shift from scheduled intervals to condition-based maintenance. As part of the study, a comprehensive MATLAB-based simulation model was created for the EP21-DTA-1200A electric locomotive motor used in push-pull trains. The model implements key diagnostic **methods**: vibration analysis to identify mechanical defects (specifically, SKF series bearings), thermal monitoring to prevent overheating, and stator current harmonic analysis for the early detection of electrical faults. To demonstrate the system's operation, the model includes a scenario simulating a bearing outer ring defect, characterized by an increase in vibration amplitude at the characteristic BPFO frequency. **The main result** is the proposed architecture of an integrated diagnostic system, including data collection, signal processing, analytics, and decision-making layers. An algorithm based on weighted indices generates specific recommendations, ranging from continued operation to immediate shutdown. **The practical significance** of this work lies in the fact that implementing this methodology on the Russian railway network will improve the reliability and safety of high-speed rolling stock, reduce the cost of unscheduled repairs, and optimize maintenance logistics by moving it to a predictive basis.

Keywords: diagnostics, high-speed train, push-pull, propulsion system, engine components, monitoring

References

1. Obukhov M. Yu., et al. Ob osnovnykh napravleniyakh razvitiya ekologicheskogo chistogo tyagovogo podvizhnogo sostava [On the Main Directions for the Development of Environmentally Friendly Traction Rolling Stock], *Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Electronics and Electrical Equipment of Transport]*, 2021, no. 2, pp. 32–35. (In Russian)
2. Obukhov M. Yu., et al. Razvitie zheleznodorozhnykh passazhirskikh perevozok za schet primeneniya tekhnologii Push-Pull [Development of Rail Passenger Transportation Through the Application of Push-Pull Technology], *Lokomotiv*, 2025, no. 4, pp. 2–5. (In Russian)
3. Obukhov M. Yu., et al. Tekhnologiya Push-Pull dlya Rossii: aktual'nye resheniya [Push-Pull Technology for Russia: Current Solutions], *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolij: tekhnika zheleznykh dorog [Railway Equipment]*, 2025, no. 2 (70), pp. 30–35. (In Russian)
4. Zelenchenko A. P., Fedorov D. V. Diagnosticheskie komplekсы elektricheskogo podvizhnogo sostava [Diagnostic Systems for Electric Rolling Stock], Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [Federal State Budgetary Educational Institution "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport"], 2014, 112 p. (In Russian)
5. Vorob'ev A. A., Gorskiy L. V. Optimizatsiya sistemy remonta lokomotivov [Optimization of the Locomotive Repair System], Moscow, Transport, 1994, 208 p. (In Russian)
6. Gioev Z. G. Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem lokomotivov: monografiya [Fundamentals of Vibroacoustic Diagnostics of Electromechanical Systems of Locomotives: A Monograph], Vladikavkaz, RUHS, 2007, 278 p. (In Russian)
7. Sapozhnikov V. V. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zh.-d. transporta [Fundamentals of Technical Diagnostics: a Textbook for Students of Higher Education Institutions of Railway Transport], Moscow, Marshrut [Route], 2004, 318 p. (In Russian)
8. Lepikhova V. A., Lyashenko N. V. Algoritmizatsiya dlya vibroakusticheskoy diagnostiki mekhanicheskikh uzlov tyagovykh dvigatelej [Algorithmization for Vibroacoustic Diagnostics of Mechanical Units of Traction Motors], *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], 2023, no. 2 (218), pp. 112–115. (In Russian)

9. Bezborodov Yu. Ya., et al. Vibroakusticheskaya diagnostika defektov podshipnikovogo uzla tyagovykh dvigatelej [Vibroacoustic Diagnostics of Defects in the Bearing Unit of Traction Motors], *Sovremennye tendentsii v razvitii i konstruirovanii kollektornykh mashin postoyannogo toka [Modern Trends in the Development and Design of DC Commutator Machines]*, Omsk, June 1–4, 1993, Omsk Institute of Railway Engineers, 1993, pp. 88–89. (In Russian)

10. Ponomarev I.S., et al. Razvitie metodov diagnostiki asinkhronnogo tyagovogo elektroprivoda, primenyayemogo na vysokoskorostnom podvizhnom sostave [Development of Diagnostic Methods for an Asynchronous Traction Electric Drive Used on High-Speed Rolling Stock], II International Scientific Conference “Railway: The Path to the Future”: Collection of materials from graduate students and

young scientists for the 80th anniversary of the graduate school and scientific center “Economics of Complex Projects and Tariff Formation” of JSC VNIIZhT, Moscow, April 18, 2024, Moscow, Scientific Publishing Center Infra-M, 2024, pp. 128–133. (In Russian)

Received: March 13, 2026

Accepted: May 01, 2026

Autor’s information:

Ilya S. PONOMAREV — Graduate Student,
Lead Engineer; iliy-ponomarev@mail.ru

Mikhail Yu. OBUKHOV — Head of the New
Equipment Department of the Technical Service;
ObuhovMY@center.rzd.ru

Dmitry A. ELIN — Graduate Student, Engineer;
i@dimaelin.ru

Andrey M. EVSTAF’EV — Dr. Sci.
in Engineering, Professor, Head of the Department
of Electric Traction;
elt@pgups.ru

УДК 629.423.25

Повышение управляемости системы пневматического торможения грузового поезда

В. Ф. Танаев^{1, 2}, А. М. Рогов²

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

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

Для цитирования: Танаев В. Ф., Рогов А. М. Повышение управляемости системы пневматического торможения грузового поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 326–340. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-326-340

Аннотация

Цель: одним из наиболее значимых недостатков системы пневматического торможения грузовых поездов является ее плохая управляемость, обусловленная значительным разбросом характеристик тормозных приборов, значений конструктивных параметров тормозной системы, загрузки вагонов, условий сцепления колес с рельсами, а также условий окружающей среды. В статье предлагается способ повышения управляемости пневматической тормозной системы грузового поезда за счет управления процессом торможения по величине остаточной работы тормозной силы, определяемой в процессе оперативного прогнозного расчета тормозной траектории, и мгновенной тормозной мощности, контролируемой в процессе торможения. **Методы:** в работе выполнены анализ способов прогнозирования регулировочного торможения и модельный эксперимент по определению параметров прицельного регулировочного торможения поезда. **Результаты:** предложен алгоритм предварительного прогнозного расчета торможения и приведены результаты проверки способа на функциональной математической модели, подтверждающие его эффективность. **Практическое применение:** использование предложенного способа управления пневматическим торможением грузового поезда в системах автоведения позволит повысить точность управления поездом в режимах торможения, что особенно важно при организации движения поездов с применением современных технологий координатного регулирования движения.

Ключевые слова: пневматическое торможение, грузовой поезд, тормозная система, тормозная сила, управление, работа тормозной силы, отпуск тормоза, прицельное торможение

Как известно, одним из наиболее значимых недостатков системы пневматического торможения грузовых поездов является ее плохая управляемость. Процесс управления поездом дополнительно осложняется отсутствием возможности плавного регулирования тормозной силы и значительной случайной составляющей в ее зависимости от ступени торможения — ступени разрядки тормозной магистрали (ТМ).

В результате торможение даже одного и того же поезда представляет собой неста-

ционарный случайный процесс, реализации которого в разных циклах торможения могут существенно отличаться [1].

Следствием нестабильности тормозных характеристик состава поезда является невозможность достоверного прогнозирования результатов торможения при ручном управлении тормозами, что приводит к существенным потерям времени хода.

Актуальность проблемы повышения управляемости системы пневматического торможения

грузового поезда существенно возрастает при организации движения поездов с использованием современных технологий интервального регулирования. Одним из основных условий устойчивости пакетов поездов при движении в режиме виртуальной сцепки являются точный прогноз траектории перемещения каждого из поездов пакета в пространстве координат состояния и высокая точность ее реализации, которые возможны только при высокой степени управляемости поезда как в режиме тяги, так и в режиме торможения [2].

Современные системы автоведения обеспечивают ее в режиме тяги, электрического и электропневматического (для пассажирских поездов) торможения [3]. Для пневматического торможения грузовых поездов удовлетворительная точность достигается только при выполнении остановочных торможений перед запрещающим сигналом (САУТ) [4]. Задача повышения точности управления поездом при регулировочных торможениях по-прежнему остается актуальной.

Задача автоматизации управления прямым автоматическим тормозом грузового поезда впервые была поставлена Б.Д. Никифоровым в начале 80-х годов прошлого столетия [5]. Предложенная им адаптивная система прицельного торможения грузового поезда (САУТ) включала комплекс напольной и бортовой аппаратуры. Функция напольной аппаратуры (генератора импульсов) заключалась в передаче на локомотив информации о длине блок-участка, на который вступает поезд. Комплекс бортовой аппаратуры выполнял следующие функции:

- прием и запоминание информации о длине блок-участка или станционного пути;
- определение допустимой скорости движения в конце блок-участка на основании информации от путевого генератора и непрерывно принимаемых сигналов АЛСН;

- установление величины тормозного коэффициента поезда при выполнении проверки эффективности действия тормозов и других торможениях;

- определение допустимой скорости движения по блок-участку (при следовании на зеленый сигнал светофора) и формирование с учетом реальных значений тормозного коэффициента программной кривой снижения скорости до уровня ограничения или до нуля (при следовании на желтый и красный сигнал соответственно);

- поддержание программной скорости с применением нескольких ступеней торможения.

Основные принципы функционирования этого комплекса были положены в основу современной системы автоматического управления торможением (САУТ) и развиты в ней с учетом возможностей современной элементной базы. Кривая программной скорости в настоящее время рассчитывается с учетом не только тормозного коэффициента поезда, но и профиля участка пути. Последняя модификация системы (САУТ-Ц485) может взаимодействовать по CAN-интерфейсу с КЛУБ-У и другими системами безопасности, от которых в аппаратуру передается ряд дополнительных функций, поскольку именно САУТ-Ц485 имеет возможность управлять пневматическими и электропневматическими тормозами. При управлении электропневматическими тормозами система может выполнять ступенчатое торможение и отпуск, а при управлении пневматическими тормозами по условию безопасности — только ступенчатое торможение [4].

Таким образом, САУТ изначально создавалась как средство повышения безопасности движения за счет контроля действий машиниста при подъезде к светофору с ограничивающим показанием и не может решать задачи

поддержания заданной скорости в системах координатного регулирования движения поездов при отсутствии напольных устройств.

Тем не менее ряд предложенных решений (расчет программной скорости с учетом реальных характеристик поезда, взаимодействие с системой реостатного торможения локомотива, не реализованное в современных модификациях САУТ) может быть определен как прорывной для своего времени и должен использоваться для повышения управляемости системы пневматического торможения грузового поезда при организации интервального регулирования движения поездов.

В одной из первых работ, посвященной системе автоматического управления пневматическими тормозами грузового поезда на современной (микропроцессорной) элементной базе [6], предлагается пропорционально-дифференциальный регулятор скорости поезда, в котором в качестве управляющего воздействия также используется ступень разрядки тормозной магистрали. Параметры регулятора подбирались в результате исследования процессов торможения на комплексной модели пневматической тормозной системы поезда и продольных колебаний в составе. При этом использовалась детерминированная модель изменения давления в тормозных цилиндрах вагонов в процессе торможения и отпуска, что и является основным недостатком предложенного решения.

Особенностью современных систем автоматического управления поездом является, во-первых, присутствие мощного вычислительного устройства, позволяющего решать широкий круг задач, а во-вторых, наличие информации о составе поезда и профиле участка, которая может с высокой точностью рассчитывать текущие динамические характеристики объекта управления и прогнозировать их изменение.

Возможность учета результатов такого прогноза при формировании управляющего воздействия является качественным скачком в развитии систем автоматического управления движением поезда.

В микропроцессорной системе управления торможением грузовых длинносоставных поездов [7] время начала торможения и его ступень также определяются по величине расхождения между текущим и заданным значением скорости движения поезда. Однако время отпуска тормоза определяется в результате прогнозного расчета тормозной траектории движения поезда, который начинает выполняться каждые 5 с. через 30 с после начала торможения и в течение 60 с (время на отпуск и зарядку ТС). В результате расчета определяется скорость движения поезда через 60 с от текущего момента времени. Как только она достигнет заданного значения, выполняется отпуск тормоза, через 60 с после начала которого скорость движения поезда должна достигнуть заданного значения (при условии достоверности прогнозного расчета).

Безусловным достоинством предлагаемой микропроцессорной системы управления пневматическим торможением поезда является учет возмущающего воздействия (дополнительного сопротивления движению) при определении момента отпуска тормозов, что позволяет классифицировать реализуемый в предлагаемой системе принцип регулирования как комбинированный.

Основным ее недостатком является использование заранее заданных детерминированных кривых изменения тормозной силы вагонов в процессе торможения. Известно [1], что как величина установившегося давления в ТЦ вагона после окончания его наполнения, так и кривые его изменения в начале и в конце цикла торможения характеризуются

значительным разбросом, вследствие чего использование в расчете постоянной кривой изменения тормозной силы вагона приведет к значительной погрешности расчета.

В адаптивной системе автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда [8–10] прогнозный расчет траектории поезда в процессе торможения выполняется с использованием усредненного коэффициента трения тормозных колодок о поверхности катания колес вагонов, который определяется с помощью известной зависимости:

$$\varphi_{\text{тр}} = a \cdot \frac{v+b}{c \cdot v+b}, \quad (1)$$

где v — скорость движения, км/ч.

Коэффициенты a , b , c , d для каждого поезда определяются с применением специальной многоступенчатой процедуры идентификации на основе расширенного фильтра Калмана (ЕКФ) по результатам последовательно выполняемых торможений.

Поскольку при идентификации используются усредненные значения давления в тормозных цилиндрах вагонов, идентифицированная величина коэффициента трения колодок является обобщенной характеристикой тормозной системы поезда, соответствующей определенной ступени торможения. Поэтому такая процедура идентификации предполагает наличие пусть неизвестной, но неслучайной зависимости тормозного нажатия (давления в тормозных цилиндрах вагонов) от ступени торможения. В действительности, как показано выше, эта зависимость является случайной и характеризуется значительным разбросом даже для одной и той же ступени. Эти обстоятельства будут уменьшать точность идентификации коэффициентов формулы (1) и, соответственно, точность прогнозного расчета. Дополнительным фактором, уменьшающим эту точность,

является большой разброс параметров отпуска тормозов, значительно превышающий разброс установившихся значений давления в тормозных цилиндрах и не учитываемый при идентификации коэффициентов зависимости (1).

Разброс значений давления в тормозных цилиндрах и кривых его изменения в процессе отпуска тормозов даже одного и того же поезда при разных циклах торможения является основным фактором, затрудняющим автоматизацию управления пневматическими тормозами грузового поезда.

Очевидно, что для повышения достоверности прогнозного расчета характеристики тормозной системы поезда должны определяться в каждом цикле торможения. При этом если идентификация усредненного по составу поезда значения давления в тормозных цилиндрах может выполняться по величине тормозной силы, достоверная идентификация кривой (то есть функционала) изменения тормозной силы во времени в период отпуска представляет собой сложную математическую задачу, оперативное решение которой в бортовом вычислительном устройстве может быть затруднено.

Точность прогнозного тормозного расчета существенно повышается заменой всегда расчетного значения тормозной силы B_t как управляющего воздействия на поезд величиной ее работы A_t , выполненной в процессе торможения. В отличие от силы B_t , которая, как показано выше, является случайной величиной и в процессе управления задается только дискретно и косвенно (величиной ступени торможения), ее работа регулируется непрерывно посредством изменения времени действия силы B_t (времени отпуска тормозов).

На момент начала торможения (постановки рукоятки КМ в тормозное положение) известны начальные скорость движения поезда

v_1 и координата его головы S_1 , целевые скорость поезда v_2 и координата S_2 , типы вагонов в составе поезда и их загрузка, план и продольный профиль участка пути, на котором предполагается выполнять торможение.

Движение поезда, как и любой механической системы, описывается теоремой об изменении кинетической энергии системы тел [11], которая при условии пренебрежения потерями в межвагонных соединениях применительно к поезду в режиме торможения может быть представлена выражением:

$$\Delta E_k = A_T + A_{W_0} + A_{W_D}, \quad (2)$$

где ΔE_k — изменение кинетической энергии поезда в результате торможения, Дж;

A_T — работа тормозной силы поезда в процессе торможения, Дж;

A_{W_0} — работа сил основного сопротивления в процессе торможения, Дж;

A_{W_D} — работа сил дополнительного сопротивления в процессе торможения, Дж.

Для выполнения как тормозных, так и тяговых расчетов уравнение (2) обычно записывается в форме, соответствующей принципу Д'Аламбера:

$$M \cdot (1 + \gamma) \cdot \frac{dv}{dt} = F_k - B_T - (W_0(v) + W_D(S)), \quad (3)$$

где M — суммарная масса поезда (состава и локомотива), кг;

γ — коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся масс в поезде (колесные пары локомотива и вагонов, тяговые электродвигатели локомотива, подвагонные генераторы пассажирских вагонов);

F_k — сила тяги локомотива, Н;

B_T — тормозная сила поезда, Н;

$W_0(v)$ — абсолютная суммарная сила основного сопротивления движению состава и локомотива, Н;

$W_D(S)$ — абсолютная суммарная сила дополнительного сопротивления движению состава и локомотива, Н.

Изменение скорости ($v_2 - v_1$) на расстоянии ($S_2 - S_1$) может быть достигнуто при движении с постоянным ускорением:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot (S_2 - S_1)}. \quad (4)$$

Уравнение (3) можно представить в виде:

$$B_{Ti} = -M \cdot (1 + \gamma) \cdot a - (W_0(v_i) + W_D(S_i)), \quad (5)$$

где B_{Ti} , v_i — требуемая тормозная сила и скорость движения поезда на i -м шаге интегрирования.

Интегрируя его на участке от S_1 до S_2 по интервалам пути dS , можно найти работу тормозной силы, которая требуется для снижения скорости движения до целевой v_2 к координате S_2 :

$$A_T = \int_{S_1}^{S_2} B_{Ti} \cdot dS \approx \sum_{i=1}^{\text{round}\left(\frac{S_2-S_1}{dS}\right)} (B_{Ti} \cdot dS), \quad (6)$$

а также время торможения (время до обнуления тормозной силы B_{Ti}):

$$\Delta t_{\text{ост}} = \int_{S_1}^{S_2} \frac{dS}{v_i} \approx \sum_{i=1}^{\text{round}\left(\frac{S_2-S_1}{dS}\right)} \left(\frac{dS}{v_i} \right). \quad (7)$$

Для выполнения этой работы необходимо в процессе торможения реализовать среднюю тормозную мощность:

$$P_{\text{тср}} = \frac{A_T}{\Delta t_{\text{ост}}}. \quad (8)$$

Если выполняется условие $P_{\text{тср}} \leq P_{\text{пр}}$, где $P_{\text{пр}}$ — мощность реостатного тормоза локомотива, торможение может осуществляться с использованием только реостатного тормоза. В противном случае требуется применение автоматических прямодействующих пневматических тормозов.

Поскольку в уравнение (5) не входят параметры тормозной системы поезда, действительная величина работы (6), а также точность ее расчета не зависят ни от тормозных характеристик отдельных вагонов и поезда в целом, ни даже от способа торможения. Точность интегрирования уравнения (5) определяется точностью определения основного $W_0(v)$ и дополнительного $W_d(S)$ сопротивления движению

поезда, а также точностью информации о загрузке вагонов (массе поезда M).

Если предположить, что тормозная сила обнуляется в момент перевода рукоятки КМ в отпускное положение и торможение выполняется однократно, управление циклом торможения может осуществляться следующим образом (рис. 1, а).

Предварительно при следовании поезда в режиме тяги или выбега периодически

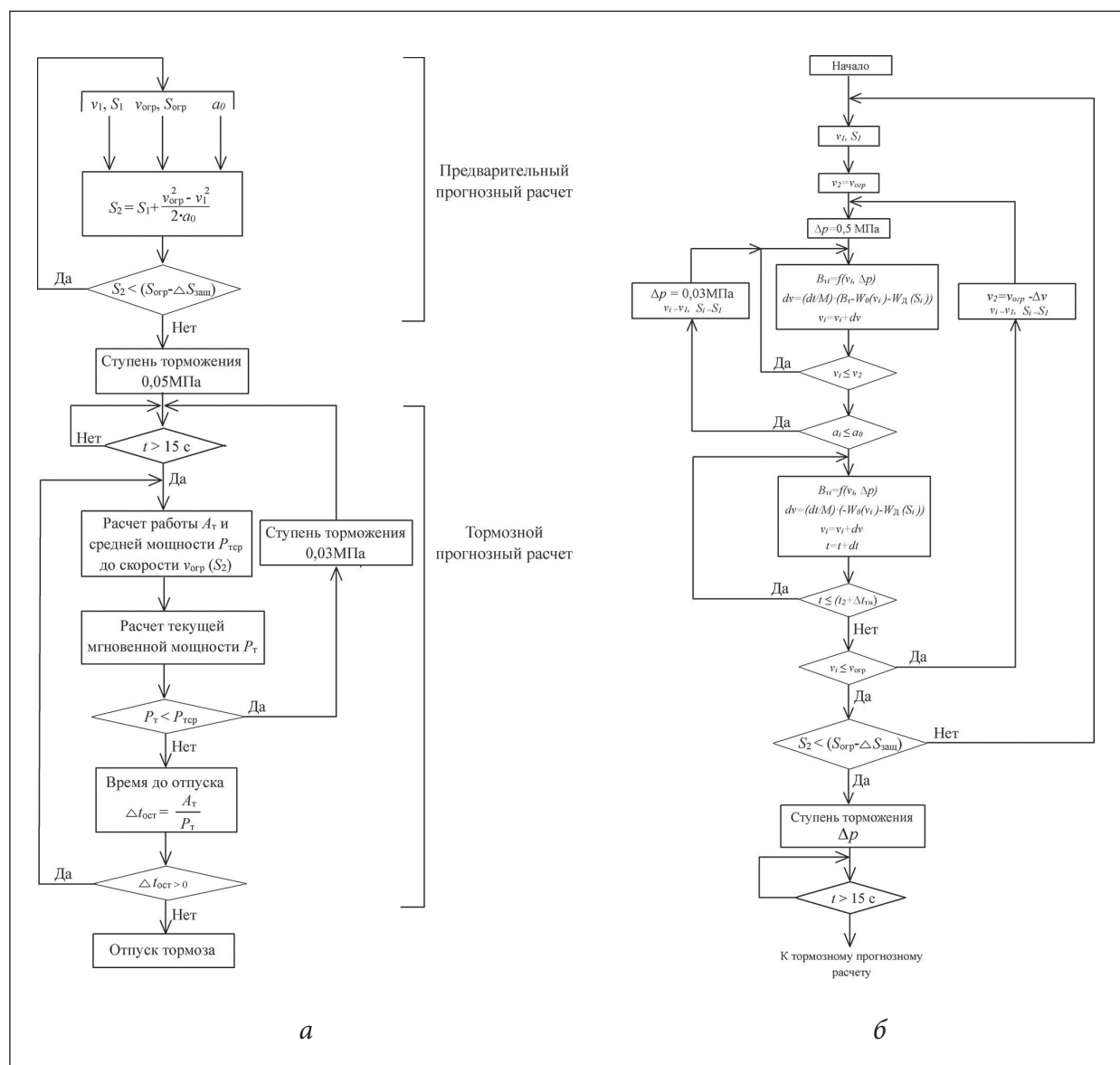


Рис. 1. Схема алгоритма: а — управления циклом торможения; б — предварительного прогнозного расчета

выполняется прогнозный расчет тормозной траектории, в процессе которого определяются прогнозная координата S_2 , соответствующая достижению заданной скорости $v_{огр}$ при торможении с постоянным заданным отрицательным ускорением α_0 . Величина α_0 для каждой координаты пути определяется исходя из обеспечения допустимого уровня продольно-динамических реакций в составе поезда с помощью любого из известных критериев [3, 12].

Если значение S_2 , полученное в результате прогнозного расчета, превышает координату границы участка ограничения скорости с учетом длины защитного участка ΔS_3 ($S_2 > (S_{огр} - \Delta S_3)$), выполняется торможение ступенью 0,05 МПа.

Через время τ_1 (длительность периода подготовки тормозов к действию) после начала снижения давления в ТМ запускается программный цикл, в ходе которого:

- проверяется выполнение условия $t_k \geq (t_k + \Delta t_{ост})$, где t_k — текущее время, соответствующее текущей координате S_k , в случае его выполнения производится отпуск тормоза и прекращение выполнения цикла;
- выполняется прогнозный расчет (5–8), в результате которого определяются значения оставшихся до конца цикла торможения (достижения скорости v_2) требуемых значений работы тормозной силы A_{tk} , оставшегося времени торможения $\Delta t_{остk}$, средней тормозной мощности $P_{тсрк}$, а также текущей тормозной мощности $P_{tk} = (-M \cdot (1 + \gamma) \cdot \alpha - (W_0(v_k) + W_d(v_k)))$, где индекс k соответствует текущей координате S_k и скорости v_k .
- проверяется условие $P_{tk} \geq P_{тсрк}$, в случае его невыполнения в течение 5 с. осуществляется дополнительная ступень торможения глубиной 0,03 Мпа с последующей проверкой этого условия через время τ_1 ;
- определяется новое прогнозное значение момента времени начала отпуска тормоза

$$t_{отнк} = t_k + \frac{A_{tk}}{P_{tk}}.$$

Цикл повторяется до момента выполнения условия $t_k \geq t_{отнк}$, которое будет соответствовать моменту достижения скорости v_2 на координате $S_k \leq S_2$.

Последнее условие обеспечивается выполнением условия $P_{tk} \geq P_{тсрк}$ в течение всего времени торможения.

При реализации алгоритма управления торможением, представленного на рис. 1, а, необходимо учитывать ряд важных замечаний:

1. В [5] рекомендуется выполнять торможение начальной ступенью 0,07–0,08 МПа, однако следствием применения увеличенной ступени снижения давления в тормозной магистрали может быть превышение заданной величины отрицательного ускорения α_0 и увеличения уровня продольно-динамических реакций в составе поезда. С другой стороны, применение минимальной начальной ступени при торможении на затяжном уклоне может привести к недостаточной эффективности применения тормоза и проезду координаты S_2 со скоростью, превышающей v_2 .

Поэтому желательно на стадии предварительного прогнозного расчета выполнять оценку величины требуемой ступени торможения Δp , для чего необходимо располагать регрессионной зависимостью $B_T = f_B(v, \Delta p)$, уникальной для каждого поезда.

2. Описанный алгоритм позволяет обеспечить высокую точность управления пневматическим тормозом грузового поезда при условии справедливости сделанного выше допущения об обнулении тормозной силы в момент отпуска. Однако такое допущение не соответствует реальному процессу отпуска тормоза, который занимает продолжительное время, причем снижение давления в тормозных цилиндрах и,

соответственно, уменьшение тормозной силы начинается по истечении 20 с и более от момента перевода рукоятки КМ в отпускное положение [13].

Поэтому полное остаточное время торможения $\Delta t_{\text{отпк}}$ на текущий момент t_k отличается от времени до начала отпуска $\Delta t_{\text{отпк}}$, которое учитывает работу $\Delta A_{\text{отп}}$ тормозной силы, выполняемую в течение отпуска ($\Delta t_{\text{отпк}} < \Delta t_{\text{отрк}}$):

$$\begin{aligned} A_{\text{тк}} &= A'_{\text{тк}} + \Delta A_{\text{отп}} \rightarrow A'_{\text{тк}} = A_{\text{тк}} - \Delta A_{\text{отп}}, \\ t_{\text{отпк}} &= t_k + \Delta t_{\text{отпк}} \rightarrow t_{\text{отпк}} = t_k + \frac{A'_{\text{тк}}}{P_{\text{тк}}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $A_{\text{тк}}$ — работа тормозной силы, которая должна быть выполнена до окончания отпуска, Дж;

$\Delta A_{\text{отп}}$ — работа тормозной силы, которая будет выполнена после перевода рукоятки КМ в отпускное положение, Дж;

$A'_{\text{тк}}$ — работа тормозной силы, которая должна быть выполнена до начала отпуска, Дж;

$P_{\text{тк}}$ — средняя тормозная мощность, которая должна развиваться от текущего момента t_k до окончания отпуска, кВт.

Предполагаемая на текущий момент времени t_k скорость начала отпуска:

$$v'_{2k} = v_k + \alpha_k \cdot \Delta t_{\text{отпк}}, \quad (10)$$

где v_k, α_k — текущие значения скорости и ускорения поезда, м/с, м/с².

Основными факторами, определяющими величину работы $\Delta A_{\text{отп}}$, являются установившееся после окончания наполнения тормозных цилиндров вагонов значение тормозной силы поезда B'_t , эквивалентное среднему давлению в ТЦ вагонов; скорость начала отпуска v'_t и скорость окончания отпуска (окончания опорожнения тормозных цилиндров) $v_{\text{отп}}$. При однократном торможении можно принять $v_{\text{отп}} = v_2$.

Поскольку B'_t является случайной величиной, значение работы $\Delta A_{\text{отп}}$ также является случайной величиной, отличающейся в разных циклах торможения одного и того же поезда даже при одинаковых ступенях торможения. Ее текущая оценка может быть выполнена с использованием уравнения регрессии вида $\Delta A_{\text{отпк}} = f_A(B'_t, v'_{2k}, v_{\text{отп}})$, коэффициенты которого уточняются по данным нескольких циклов торможения.

3. Предположение об однократном торможении и окончании отпуска при скорости v_2 соответствует выполнению условия $W_{\text{д}}(S_2) \geq 0$, которое исключает увеличение скорости движения поезда после окончания отпуска и необходимость выполнения повторных регулировочных торможений. Если это предположение не выполняется, при определении момента отпуска необходимо учитывать последующее увеличение скорости поезда в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$, необходимого для зарядки тормозной системы. В этом случае скорость окончания отпуска должна выбираться таким образом, чтобы при последующем разгоне поезда в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$ скорость не успела превысить заданное значение $v_{\text{огр}}$. При наличии на локомотиве электрического тормоза он может использоваться для ограничения ускорения поезда в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$.

С учетом этих замечаний предлагается следующий алгоритм управления прицельным торможением грузового поезда.

На первом этапе в процессе движения поезда выполняется предварительный прогнозный расчет, в ходе которого решаются следующие задачи:

1. Определяется ступень торможения Δr , необходимая для снижения скорости движения поезда от текущего значения v_1 до заданного значения v_2 с заданным для текущей координаты S_1 значением среднего

отрицательного ускорения α_0 , и соответствующая v_2 координата S_2 ;

2. Определяется скорость окончания отпуска $v_{\text{отп}}$ тормоза $v_{\text{отп}} \leq v_2$, учитывающая возможный последующий разгон поезда до v_2 в течение времени $\Delta t_{\text{тм}}$, величина которого может быть принята равной 60 с.

На этом этапе тормозная траектория поезда определяется в результате интегрирования основного уравнения его движения, представленного в виде:

$$dv = \frac{dt}{M \cdot (1 + \gamma)} \left(-B_{\text{т}} - (W_0(v) + W_{\text{д}}(S)) \right). \quad (11)$$

Схема алгоритма предварительного прогнозного расчета представлена на рис. 1, б. Во внутреннем цикле алгоритма решается первая задача, во внешнем цикле — вторая. При определении требуемой ступени торможения используется регрессионная зависимость $B_{\text{т}} = f_B(v, \Delta p)$, коэффициенты которой определены по результатам проверки эффективности действия тормоза. Порядок определения коэффициентов этой регрессии выходит за рамки данной работы и является предметом отдельного обсуждения. При решении второй задачи в качестве тормозной силы $B_{\text{т}}$ используется усилие реостатного тормоза при его наличии на локомотиве, в противном случае принимается $B_{\text{т}} = 0$.

Если значение S_2 , полученное в результате предварительного прогнозного расчета, превышает координату границы участка ограничения скорости с учетом длины защитного участка ΔS_3 ($S_2 > (S_{\text{отп}} - \Delta S_3)$), выполняется торможение ступенью Δp .

Через 15 с после выполнения торможения начинает периодически выполняться основной прогнозный расчет, схема алгоритма которого приведена на рис. 1, а. При этом в качестве заданной скорости в процессе торможения используется скорость $v_{\text{отп}}$, а текущая оценка

времени отпуска $t_{\text{отпк}}$ рассчитывается с учетом текущей оценки работы отпуска $\Delta A_{\text{отпк}}$, вычисленной с использованием регрессионной зависимости $\Delta A_{\text{отпк}} = f_A(B'_{\text{т}}, v'_{2k}, v_{\text{отп}})$, задача определения которой выходит за рамки данной работы.

С целью проверки эффективности предлагаемого способа управления торможением грузового поезда была разработана функциональная математическая модель тормозной системы поезда. Кривые наполнения и опорожнения тормозных цилиндров вагонов моделировались дискретными кривыми с учетом скорости распространения тормозной и отпускной волн [5]. Поскольку предлагаемый способ предполагает непрерывный контроль энергетических характеристик каждого цикла торможения, разброс параметров процессов наполнения и опорожнения тормозных цилиндров в разных циклах торможения, оказывающий влияние на эти характеристики, будет учитываться при определении времени отпуска тормоза.

Помимо предлагаемого способа управления пневматическим тормозом, в модели реализован оригинальный алгоритм совместного использования пневматического и реостатного тормоза локомотива, описание которого выходит за рамки данной работы.

На рис. 2 представлены результаты моделирования прицельного регулировочного торможения поезда массой 5600 т на уклоне 0,005. Для удобства отображения разновеликих параметров на рисунке представлены изменения их относительных значений.

Как следует из рисунка, за 400 м до расчетной целевой координаты, определяемой по заданной координате начала участка ограничения 5000 м (пунктирная линия) с учетом длины защитного участка, увеличивается тормозная мощность реостатного тормоза (до этой

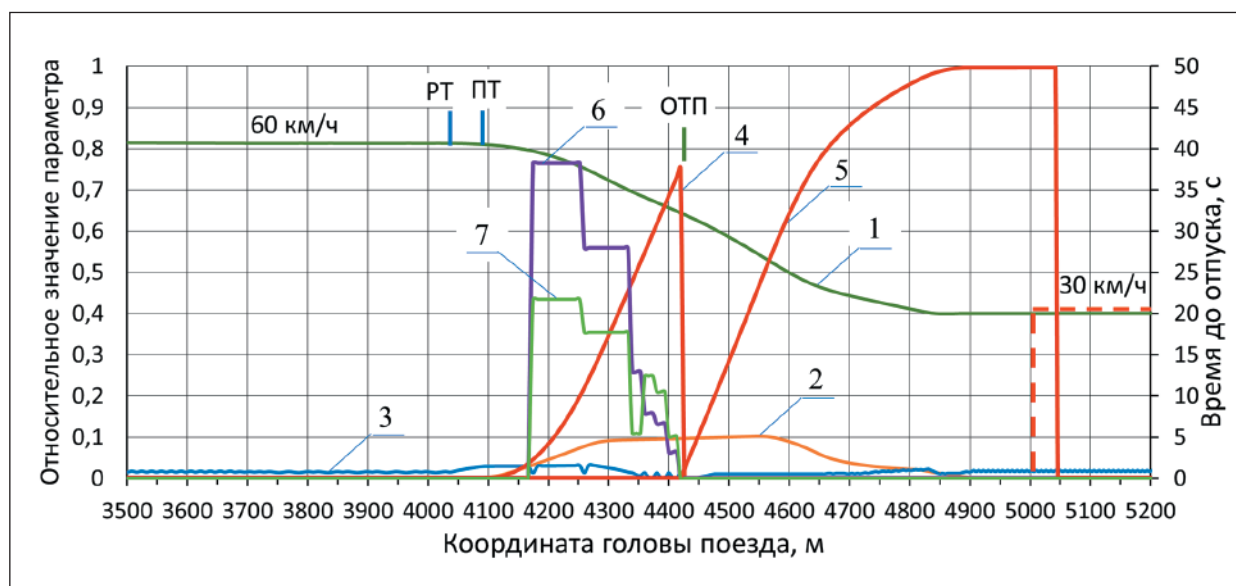


Рис. 2. Процесс прицельного регулировочного торможения поезда массой 5600 т на уклоне 0,005: 1 — скорость движения; 2 — тормозная сила пневматического тормоза поезда; 3 — тормозная сила электрического тормоза; 4 — выполненная работа тормозной силы пневматического тормоза в процесс торможения до отпуска; 5 — выполненная работа тормозной силы пневматического тормоза после начала отпуска; 6 — оценка работы тормозной силы до начала отпуска по результатам прогнозного расчета; 7 — оценка времени до начала отпуска

точки реостатный тормоз использовался для поддержания максимальной разрешенной скорости следования по участку, равной 60 км/ч) для сжатия состава, после чего выполняется торможение ступенью, определенной в результате предварительного прогнозного расчета.

В процессе торможения реостатный тормоз локомотива не выключается и работает как регулятор заданного отрицательного ускорения ($-0,15 \text{ м/с}^2$).

Через 5 с после начала торможения в результате основного прогнозного расчета выполнена оценка работы тормозной силы до начала отпуска (линия 6) и времени, оставшегося до начала отпуска (линия 7 — примерно 22 с). Через 5 с выполняется новый прогнозный расчет, результатом которого являются уменьшенные оценки оставшейся работы тормозной силы и времени до отпуска.

При уменьшении времени до нуля выполняется отпуск тормоза с одновременным увеличением мощности реостатного тормоза на 10% для сдерживания головной части поезда в процессе отпуска. При этом величина работы, выполненной от момента начала торможения до момента окончания отпуска (линия 4), соответствует ее первоначальной прогнозной оценке (линия 6) с точностью до нескольких процентов, что обеспечило соответствие заданной целевой координате (с учетом защитного участка) практически без перерегулирования по скорости.

Существенно более сложная задача решается системой управления в ситуации, результаты моделирования которой представлены на рис. 3. На уклоне крутизной 0,01 мощности реостатного тормоза недостаточно для стабилизации максимальной скорости,

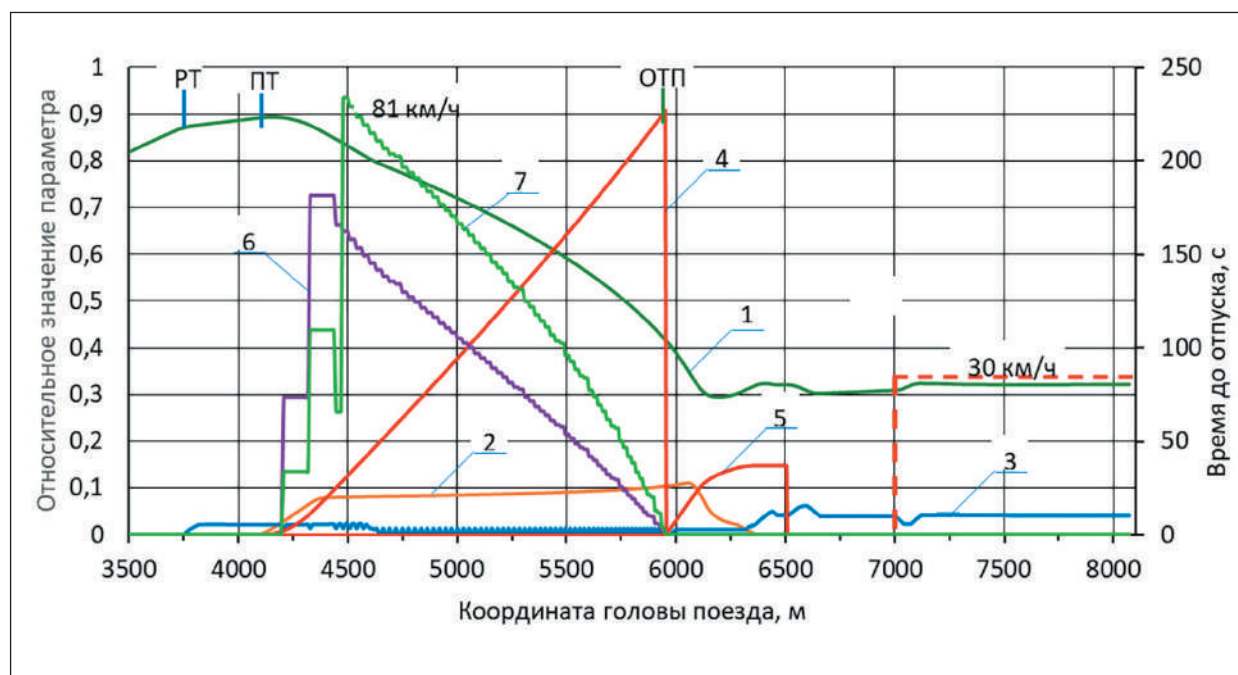


Рис. 3. Процесс прицельного регулировочного торможения поезда массой 5600 т на уклоне 0,010. Экспликация соответствует рис. 2

установленной на участке (80 км/ч). При ее достижении в процессе разгона после предыдущего торможения включился регулятор скорости на основе реостатного тормоза, который вывел тормоз на максимальную мощность (линия 3 на отметке примерно 3750 м), обеспечив предварительное сжатие состава.

При достижении скорости 81 км/ч выполнена ступень пневматического торможения 0,05 МПа, которая была определена предварительным прогнозным расчетом для торможения до целевой скорости с ускорением $-0,15 \text{ м/с}^2$. Поскольку торможение выполнялось для ограничения скорости, заданная скорость в момент торможения была установлена равной 80 км/ч, поэтому в результате основного прогнозного расчета, выполненного через 15 с после начала торможения, получена минимальная оценка требуемой работы торможения (линия 6).

Однако расчетная координата окончания зарядки тормозной системы после тормо-

жения, определенная в результате этого же расчета, превысила величину целевой координаты (7000 м). Это означает, что в случае выполнения регулировочного торможения на максимальную допустимую скорость 80 км/ч тормозная система не успеет зарядиться для выполнения прицельного торможения на координату 7000 м, поэтому уже в процессе торможения заданная скорость была изменена на целевую (30 км/ч), а торможение продолжилось с минимальным ускорением.

Показательной особенностью предлагаемого алгоритма является изменение ошибки оценки остаточной работы, которая должна быть выполнена до начала отпуска. На отметке 4300 м она составляла примерно 18% за счет использования в прогнозном расчете постоянного заданного отрицательного ускорения $-0,15 \text{ м/с}^2$. На отметке 5000 м ошибка уже не превышала 8%, на отметке 5500 м уменьшилась до 3%.

Таким образом, осуществляется непрерывный контроль процесса торможения в каждом цикле, что позволяет существенно уменьшить влияние разброса и нестабильности характеристик тормозной системы поезда на точность управления торможением.

По результатам представленной работы могут быть сделаны следующие выводы:

1. Несмотря на расширение функциональных возможностей современных систем автоведения и повышение точности управления поездом в режимах тяги и торможения, проблема повышения управляемости системы пневматического торможения грузового поезда по-прежнему является актуальной.

2. Вычислительные возможности бортовых комплексов современных локомотивов позволяют осуществлять прогнозный расчет тормозной траектории поезда с использованием результатов идентификации характеристик тормозной системы поезда.

3. Значительный разброс и случайный характер изменения тормозных характеристик состава поезда обуславливают необходимость их идентификации в каждом цикле торможения.

4. Повышение управляемости пневматической тормозной системы грузового поезда может быть достигнуто за счет управления процессом торможения по величине остаточной работы тормозной силы, определяемой в процессе оперативного прогнозного расчета тормозной траектории, и мгновенной тормозной мощности, контролируемой в процессе торможения.

5. Предложены способ повышения управляемости пневматической тормозной системы грузового поезда за счет учета энергетических характеристик тормозного цикла и алгоритм его реализации.

6. Предварительные результаты проверки предложенного способа управления пневма-

тическим торможением грузового поезда на математической модели подтвердили его работоспособность и высокую эффективность.

7. Применение предложенного способа управления пневматическим торможением грузового поезда в системах автоведения позволит повысить точность управления поездом в режимах торможения.

Список источников

1. Танаев В.Ф. Повышение управляемости тормозов грузовых поездов за счет применения электрического торможения // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Ремонт и динамика'25» (Омск, 15–17 октября 2025 год). Омск: ОмГУПС, 2025. С. 295–303.

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

3. Жухин О.Н. Совершенствование системы автоматического управления скоростью грузового поезда: дис. ... канд. техн. наук. М.: РУТ МИИТ, 2024. 178 с.

4. Аппаратура локомотивная системы автоматического управления торможением поездов САУТ-ЦМ/485: руководство по эксплуатации: в 3 ч. 97Ц.06.00.00-01 РЭ.

5. Никифоров Б.Д., Головин В.И., Кутыев Ю.Г. Автоматизация управления торможением поездов. М.: Транспорт, 1985. 263 с.

6. Лосев В.В. Автоматическое микропроцессорное управление пневматическими тормозами грузового поезда: дис. ... канд. техн. наук. М., 1996. 210 с.

7. Пудовиков О.Е., Муров С.А. Микропроцессорная система автоматического управления пневматическим торможением грузовых длинносоставных поездов // Электротехника. 2014. № 8. С. 29–33.

8. Пудовиков О.Е., Менакер Г. М. Система управления пневматическим тормозом грузового поезда // *Электротехника*. 2023. № 9. С. 34–39.
9. Пудовиков О.Е., Менакер Г.М. Автоматическое управление пневматическим тормозом грузового поезда // *Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции (Москва, 25 мая 2023 года)*. М.: Российский университет транспорта, 2023. С. 322–329.
10. Менакер Г.М., Пудовиков О.Е. Адаптивная система автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2025. № 2. С. 132–144.
11. Френкель С.Я. Техника тяговых расчетов: учебное пособие. Гомель: Изд-во Белорусского государственного университета транспорта, 2005. 80 с.
12. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Чесноков И. И. Динамика вагона: учеб. для вузов железнодорожного транспорта. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 360 с.
13. К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда при выполнении тяговых и тормозных расчетов / Д. Н. Курилкин [и др.] // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2025. Т. 22, № 3. С. 594–604.

Дата поступления: 13.03.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

ТАНАЕВ Валерий Фаритович — зам. генерального директора, главный инженер ОАО «РЖД», профессор кафедры «Электрическая тяга»; lt@pgups.ru
РОГОВ Александр Михайлович — аспирант; sasharogov09@mail.ru

Improving of Controllability for Freight Train Pneumatic Braking System

V. F. Tanaev^{1, 2}, A. M. Rogov²

¹JSC “Russian Railways”, 1 Novaya Basmannaya st., Moscow, 107174, Russia

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

For citation: Tanaev V. F., Rogov A. M. Improving of Controllability for Freight Train Pneumatic Braking System // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 326–340. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-326-340 (In Russian)

Abstract

Objective: one of the most significant drawbacks of the pneumatic braking system of freight trains is its poor controllability, due to a significant variation in the characteristics of the braking devices, the values of the structural parameters of the braking system, the loading of cars, the conditions of adhesion of wheels with rails, as well as environmental conditions. The article proposes a method of increasing controllability of a pneumatic braking system of a freight train by controlling the braking process by the value of residual brake force operation determined in the process of operational forecast calculation of the braking trajectory, and instantaneous braking power controlled in the process of braking. **Methods:** the paper analyzes methods for predicting regulatory braking and construct a model experiment to determine

the parameters of targeting regulatory braking for trains. **Results:** an algorithm for preliminary predictive braking calculation is proposed, and the results of testing the method on a functional mathematical model are presented, confirming its effectiveness. **Practical Importance:** the results of checking the method on a functional mathematical model confirming its effectiveness are given. Application of proposed method of control of pneumatic braking of freight train in automatic driving systems will make it possible to increase accuracy of train control in braking modes, which is especially important in arrangement of train movement using modern technologies of coordinate control of movement.

Keywords: pneumatic braking, freight train, braking system, braking force, control, brake force operation, brake release, aimed braking

References

1. Tanaev V.F. Povyshenie upravlyaemosti tormozov gruzovykh poezdov za schet primeneniya elektricheskogo tormozheniya [Increasing the controllability of the brakes of freight trains due to the use of electric braking], *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava Materialy VII vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Remont i dinamika 25" [Technological support for repair and increasing the dynamic qualities of railway rolling stock, Materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation Repair and dynamics' 25, Omsk, October 15–17, 2025]*, Omsk, 2025, pp. 295–303. (In Russian)
2. Bushuev S. V. Metody povysheniya propusknosti i provoznoj sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog tekhnicheskimi sredstvami avtomatiki: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of Increasing the Throughput and Carrying Capacity of Railway Sections by Technical Means of Automation: dis. ... Dr. Sci. in Engineering], Saint Petersburg, 2025, 364 p. (In Russian)
3. Zhukhin O.N. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu gruzovogo poezda: diss. ... kand tekhn. nauk [Improvement of the Automatic Control System for the Speed of a Freight Train, dis. ... Dr. Sci. in Engineering], *Russian University of Transport (RUT MIIT)*, Moscow, 2024, 178 p. (In Russian)
4. Apparatura lokomotivnaya sistemy avtomaticheskogo upravleniya tormozheniem poezdov SAUT-TsM/485 [Locomotive Equipment of the Automatic Braking Control System of SAUT-TsM/485 trains], *Operation manual in 3 parts. 97TS.06.00.00-01 RE* (In Russian)
5. Nikiforov B.D., et al. Avtomatizatsiya upravleniya tormozheniem poezdov [Automation of Train Braking Control] Moscow, *Transport*, 1985, 263 p. (In Russian)
6. Losev V. V. Avtomaticheskoe mikroprotsessornoe upravlenie pnevmaticheskimi tormozami gruzovogo poezda [Automatic Microprocessor Control of Pneumatic Brakes of a Freight Train], dis. ... Dr. Sci. in Engineering, Moscow, 1996, 210 p. (In Russian)
7. Pudovikov O.E., Murov S.A. Mikroprotsessornaya sistema avtomaticheskogo upravleniya pnevmaticheskimi tormozheniem gruzovykh dlinnosostavnykh poezdov [Microprocessor Automatic Control System for Pneumatic Braking of Long-Component Freight Trains], *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2014, no. 8, pp. 29–33. (In Russian)
8. Pudovikov O.E., Menaker G.M. Sistema upravleniya pnevmaticheskimi tormozom gruzovogo poezda [Control System for the Pneumatic Brake of a Freight Train], *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2023, no. 9, pp. 34–39. (In Russian)
9. Pudovikov O.E., Menaker G.M. Avtomaticheskoe upravlenie pnevmaticheskimi tormozom gruzovogo poezda [Automatic Control of the Pneumatic Brake of a Freight Train], *Intellektual'nye transportnye sistemy: Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii [Intelligent Transport Systems: Materials of the II International Scientific and Practical Conference,*

May 25, 2023], Moscow, Russian University of Transport, 2023, pp. 322–329. (In Russian)

10. Menaker G.M., Pudovikov O.E. Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya pnevmaticheskim tormozom gruzovogo poezda [Adaptive Automatic Control System for the Pneumatic Brake of a Freight Train], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2025, no. 2, pp. 132–144. (In Russian)

11. Frenkel S. Ya. Tekhnika tyagovykh raschetov: uchebnoe posobie [Traction Calculation Technique: a textbook], Gomel, *Publishing House of the Belarusian State University of Transport*, 2005, 80 p. (In Russian)

12. Vershinskij S.V., Danilov V.N., Chesnokov I.I. Dinamika vagona: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Dynamics of the Car: Textbook for Universities Railway Transport], 3rd edit., revised and expanded, Moscow, *Transport*, 1991, 360 p. (In Russian)

13. Kurilkin D.N., et al. K voprosu ucheta inertsionnosti tormoznoj sistemy gruzovogo poezda pri vypolnenii tyagovykh i tormoznykh raschetov [On the Issue of Taking into Account the Inertia of the Brake System of a Freight Train when Performing Traction and Brake Calculations], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University], 2025, vol. 22, no. 3, pp. 594–604. (In Russian)

Received: March 13, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Valerij F. TANAEV — Deputy General Director, Chief Engineer of Russian Railways, Professor of the Department “Electric Propulsion”; lt@pgups.ru
Alexander M. ROGOV — Postgraduate Student; sasharogov09@mail.ru

УДК 656.03

Выбор станции дислокации для отставленных от движения поездов в пути следования как инструмент повышения эффективности работы транспортной системы

К. М. Тимухин, М. М. Аманов

Уральский государственный университет путей сообщения, Россия, 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Для цитирования: Тимухин К. М., Аманов М. М. Выбор станции дислокации для отставленных от движения поездов в пути следования как инструмент повышения эффективности работы транспортной системы // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 341–348. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-341-348

Аннотация

Цель: разработать методику выбора станций дислокации отставленных поездов, учитывающую пропускную способность, техническое оснащение и минимальное отклонение от маршрута следования грузового поезда, для обеспечения бесперебойного функционирования железнодорожной транспортной системы в условиях высокой загрузки инфраструктурных элементов. **Методы:** теоретическую основу исследования составили анализ эксплуатационной работы железнодорожных станций и участков. Для формализации задачи выбора станций дислокации применена теория графов, позволяющая представить полигон в виде взвешенного ориентированного графа. Минимальные затраты для определения станций дислокации предлагается определять с помощью алгоритма Дейкстры. **Результаты:** сформулирована и решена многокритериальная оптимизационная задача выбора станции дислокации. Предложена математическая модель выбора станции дислокации, включающая систему ограничений по техническому оснащению станции и резерву пропускной способности перегонов. **Практическая значимость:** применение предлагаемой методики позволит находить станцию для отставления грузового поезда от движения с учетом заданных ограничений. Разработанное решение повысит эффективность работы транспортной сети, снизит эксплуатационные затраты перевозчика и минимизирует риски нарушения сроков доставки грузов. Внедрение предложенного подхода создает условия для формирования управляемого «буфера» из отставленных составов, разгружая грузонапряженные участки и обеспечивая устойчивость перевозочного процесса при инфраструктурных ограничениях.

Ключевые слова: отставленные от движения грузовые поезда, каскадный эффект, станция дислокации, пропускная способность, теория графов, алгоритм Дейкстры

Введение

В адрес крупных промышленных центров прибывает поездопоток в значительных объемах, который близок к наличной пропускной способности участков [1]. При отсутствии инфраструктурных резервов любое отклонение от нормальной работы станции или путей необщего пользования влияет на поездную работу прилегающих направлений. Поэтому

в отношении необработанных станций поездов поездным диспетчером принимается решение об их отставлении от движения [2]. Зачастую отставляют от движения такие поезда по принципу ближайших станций, что сокращает наличие свободных приемо-отправочных путей на них ΔU (рис.1). Это ограничивает возможность принимать, отправлять и пропускать поезда, а также осуществлять

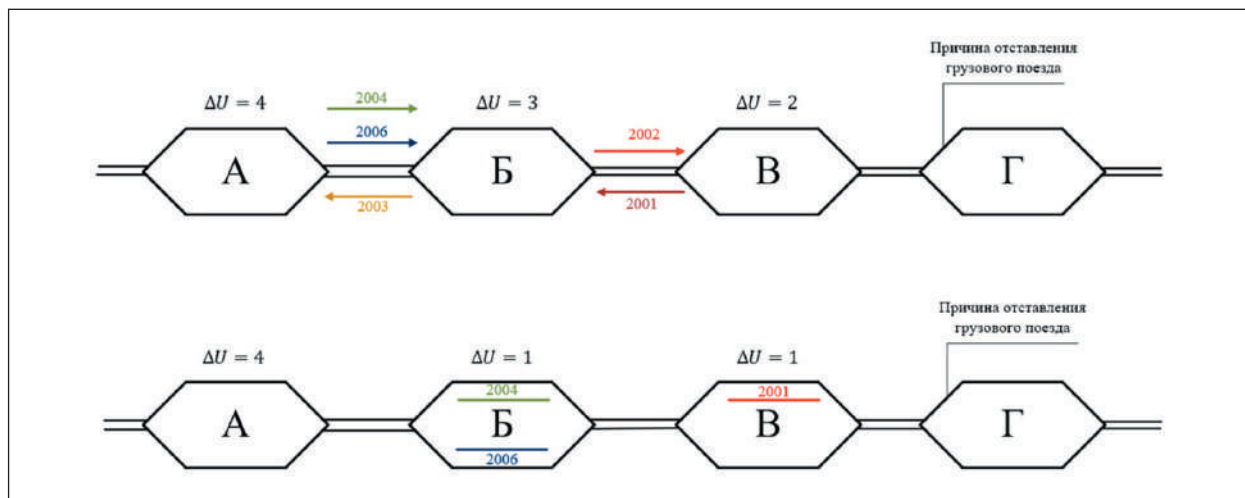


Рис. 1. Влияние отставленных от движения грузовых поездов на пропускную способность железнодорожных станций

маневровую работу на объектах транспортной инфраструктуры [3].

С другой стороны, при помощи отставленных от движения поездов можно регулировать поездопотоки.

При выборе станции с инфраструктурным резервом создается так называемый управляемый буфер, который позволит разгрузить наиболее напряженные участки. В результате появляется возможность обеспечить беспрепятственный пропуск поездов на прилегающих направлениях, не допуская их скопления перед узким местом, и тем самым предотвратить развитие каскадного эффекта.

Выбор станции дислокации

Выбор станции дислокации отставленных поездов играет ключевую роль в повышении эффективности железнодорожных перевозок, оптимизации использования путевой инфраструктуры и снижении эксплуатационных затрат. Рациональное размещение составов позволяет минимизировать простои, повысить пропускную способность сети и увеличить участковую скорость [4].

Ключевыми условиями выбора станции дислокации являются:

1. Отсутствие влияния на поездную работу при выполнении движения поездов, следующих по ниткам графика.
2. Отсутствие влияния на маневровую работу на станции дислокации.
3. Минимальное отклонение от маршрута следования грузового поезда.
4. Наличие необходимого технического оснащения на станциях дислокации.
5. Обеспечение безопасности движения поездов.

Пусть $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ — множество всех станций полигона (рис. 2).

Важно также учитывать, что выбор станции дислокации должен быть обоснован с учетом ее технических возможностей. Станция должна обладать возможностью принимать поезда и иметь свободные пути в приемо-отправочном парке.

Для станции $s \in S$ резерв путей рассчитывается по формуле (1):

$$\Delta U(s) = u_k(s) - \frac{\frac{n_k(s)t_{зан}(s)}{\gamma_k(s)} + T_{ном}(s)}{2}, \quad (1)$$

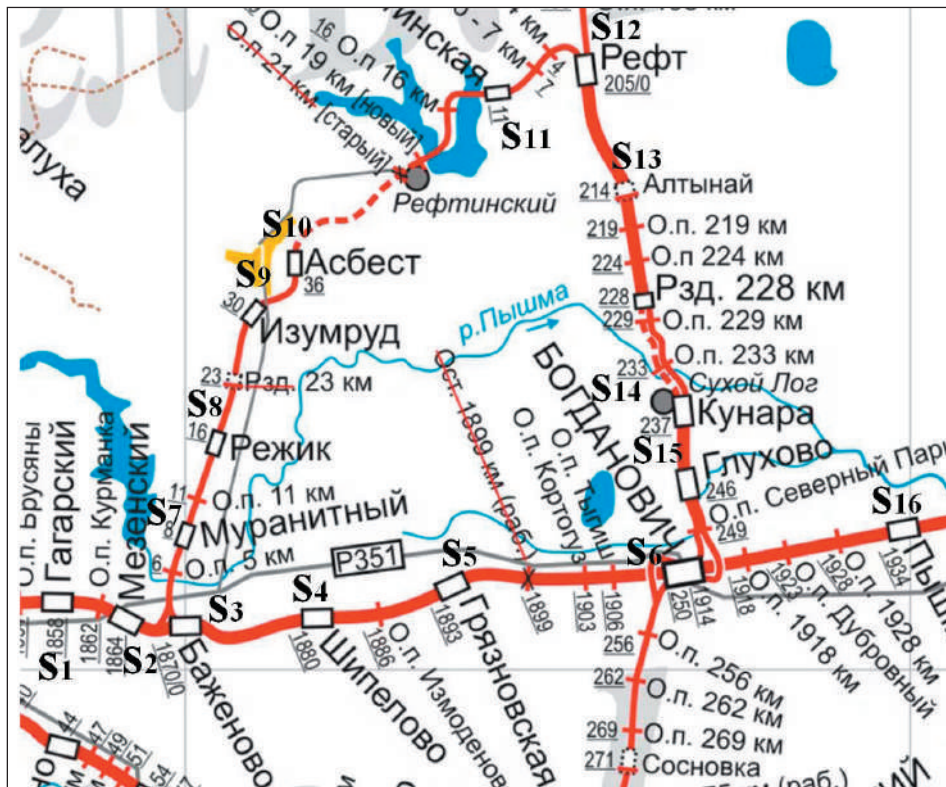


Рис. 2. Фрагмент карты Свердловской железной дороги (источник: [https://megavtogonal.com/11-foto/schema-sverdlovskoj-zhd-dorogi-so-stanciyami-86-foto.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%](https://megavtogonal.com/11-foto/schema-sverdlovskoj-zhd-dorogi-so-stanciyami-86-foto.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F))

где $u_k(s)$ — общее количество путей в приемо-отправочном парке станции;

$n_k(s)$ — общее количество поездов, прибывающих на станцию;

$t_{зан}(s)$ — время занятия приемо-отправочного парка операциями, зависящими от размеров движения, приходящееся на 1 грузовой поезд, ч;

$\gamma_k(s)$ — технически рациональный уровень занятия путей в приемо-отправочном парке станции;

$T_{просл}(s)$ — время занятия приемо-отправочного парка постоянными операциями, ч;

α, β — коэффициенты, учитывающие влияние пассажирских и сборных поездов соответственно.

Для обеспечения бесперебойной работы по техническому осмотру и ремонту подвижного

состава необходим резерв бригад ПТО (пункт технического обслуживания) на станции дислокации $s \in S$ с учетом отставленного поезда (2). При этом уровень загрузки бригад ПТО должен быть не ниже экономически рационального и не выше технически рационального уровней [5].

$$\frac{(N_p(s) + 1) \cdot t_{обр}(s)}{1440 \cdot 0,5} \geq B(s) \geq \frac{(N_p(s) + 1) \cdot t_{обр}(s)}{1440 \cdot 0,8}, \quad (2)$$

где $N_p(s)$ — среднесуточное количество поездов, прибывающих в приемо-отправочный парк станции;

$t_{обр}(s)$ — средняя продолжительность обработки состава бригадой ПТО, ч.

С учетом всех перечисленных условий выбор станции отставления для поезда П сводится к решению следующей оптимизационной задачи (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{dist}(\Pi, s) \xrightarrow{s \in S} \min \\ \Delta U(s) \geq 1 \\ \frac{(N_p(s) + 1) \cdot t_{\text{обп}}(s)}{1440 \cdot 0,5} \geq B(s) \geq \frac{(N_p(s) + 1) \cdot t_{\text{обп}}(s)}{1440 \cdot 0,8} \end{array} \right. , (3)$$

где $\text{dist}(\Pi, s)$ — затраты, которые необходимы, чтобы поезд Π достиг станции отставления S . В качестве таких затрат может выступать расстояние или время. Если расчетное время прибытия поезда на станцию назначения s не превышает дату, указанную в транспортной железнодорожной накладной, то $\text{dist}(\Pi, s)$ — это расстояние, которое необходимо пройти поезду до станции отставления. Однако если истек срок доставки груза, то $\text{dist}(\Pi, s)$ — это время, которое необходимо пройти поезду до станции отставления.

Для определения $\text{dist}(\Pi, s)$ воспользуемся методами теории графов. Для этого представим полигон в виде графа $G = (S, R)$, в котором станции S будут являться вершинами, а ребрами будет являться R — множество перегонов между ними (рис. 3) [6].

В зависимости от того, что понимается под $\text{dist}(\Pi, s)$, ребрам графа будут присваиваться

разные веса. При этом также надо учесть резерв пропускной способности (4) для каждого ребра $r \in R$:

$$\Delta N(r) = N_n(r) - N_{\text{потр}}(r), \quad (4)$$

где $N(r)$ — наличная пропускная способность; $N_{\text{потр}}(r)$ — потребная пропускная способность.

Резерв пропускной способности определяет возможность пропуска дополнительных поездов по перегону. Если нет возможности пропустить 1 поезд по перегону, то есть если $\Delta N(r) = 0$, то будем считать, что вес ребра r составляет $w(r) = \infty$. Если $\Delta N(r) \geq 1$ и расчетное время прибытия поезда на станцию назначения не превышает дату, указанную в транспортной железнодорожной накладной, то вес каждого ребра принимается равным длине перегона $w(r) = d(r)$, $r \in R$. Однако если истек срок доставки груза, то вес ребра принимается равным времени хода по перегону $w(r) = t(r)$, $r \in R$.

Для нахождения затрат $\text{dist}(\Pi, s)$ воспользуемся алгоритмом Дейкстры, который позволяет найти кратчайшие пути из одной вершины-источника во все остальные вершины взвешенного ориентированного графа (рис. 4) [7].

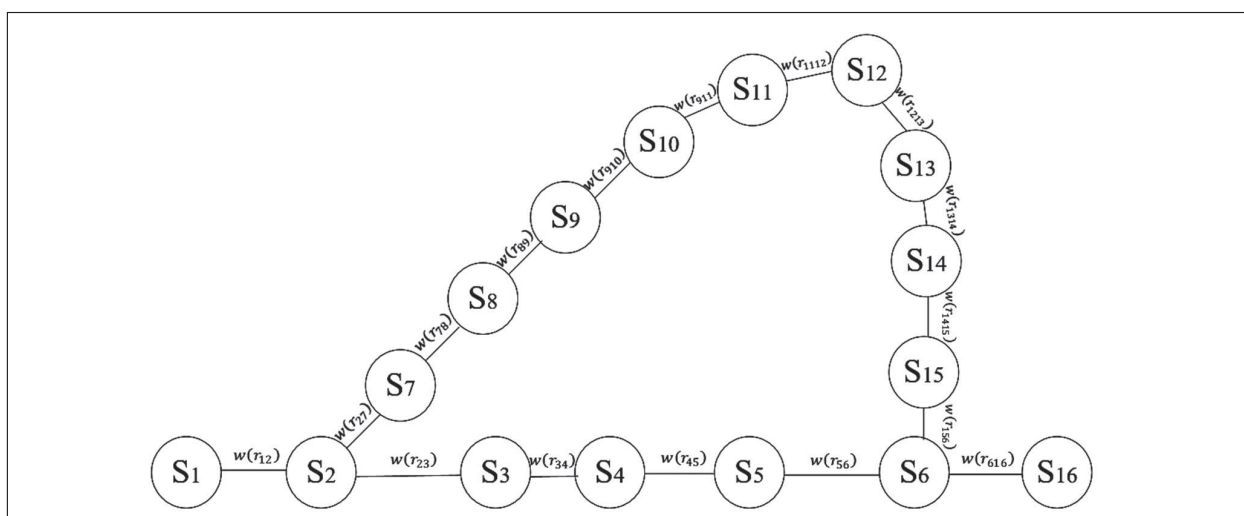


Рис. 3. Фрагмент графа

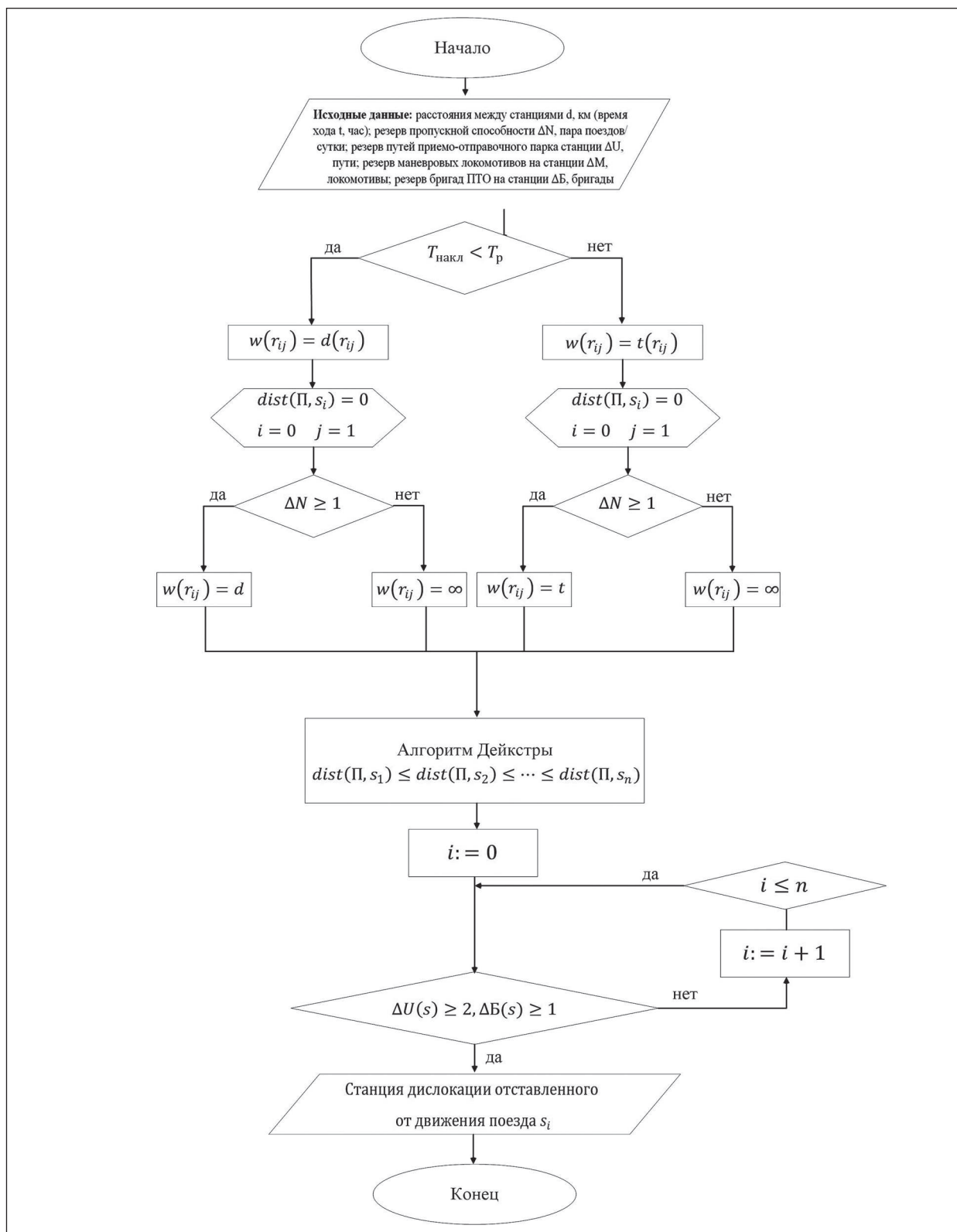


Рис. 4. Алгоритм выбора станции дислокации для временного отставления от движения грузовых поездов

Процесс начинается с инициализации. Пусть $dist(\Pi, s_0) = 0$ — значение расстояния (времени хода) для начальной вершины графа, а для всех остальных $dist(\Pi, s_n) = \infty$ [8].

Далее выполняется основной цикл до того момента, пока не будут обработаны все вершины графа (5). На каждом шаге находится вершина $j, j \in S$, с наименьшим значением веса ребра графа $d(r_{ij})$ или $t(r_{ij}) = w(r_{ij})$, где $r \in R$, при этом выполняется условие (5):

$$dist(\Pi, s_i) + w(r_{ij}) < dist(\Pi, s_j) \quad (5)$$

В этом случае принимается минимальное расстояние (время хода по перегону) равным $dist(\Pi, s_j) = dist(\Pi, s_i) + w(r_{ij})$. Процесс расчета алгоритма Дейкстры повторяется до тех пор, пока не выберем ближайшую станцию для отставления грузового поезда, при котором выполняются условие (5) и $dist(\Pi, s) = \min$ [9]. Принципиальное ограничение для алгоритма заключается в том, что веса всех ребер графа должны быть неотрицательными.

В итоге предлагается методика, позволяющая выбирать станции дислокации для временного отставления от движения грузовых поездов (рис. 4).

Выводы

1. Разработанная методика позволяет обоснованно выбирать станцию дислокации для отставления от движения грузовых поездов, учитывая техническое оснащение станции, резерв пропускной способности и минимальное отклонение от маршрута следования поезда.

2. Обоснованный выбор станции дислокации способствует снижению эксплуатационных затрат, штрафов перевозчика из-за нарушений сроков доставки и, как следствие, повышению эффективной организации работы железнодорожной транспортной системы [10].

Список источников

1. Анализ причин отставления от движения грузовых поездов на полигоне Свердловской железной дороги / Е. Н. Тимухина [и др.] // Екатеринбург: Инновационный транспорт, 2022.
2. Сотников Е. А., Холодняк П. С. Рациональная технология временной отстановки поездов от движения // Вестник ВНИИЖТ. 2019. № 78 (1). С. 3–9.
3. Об утверждении Методических рекомендаций по оформлению ОАО «РЖД» задержки вагонов, контейнеров в пути следования из-за неприема их железнодорожной станцией назначения по причинам, зависящим от грузополучателей, владельцев или пользователей железнодорожных путей необщего пользования: распоряжение ОАО «РЖД» от 22.03.2012 № 558р.
4. Тимухина Е. Н., Аманов М. М. Методика отставления от движения и «подъема» грузовых поездов // Транспорт Урала. 2025. № 3.
5. Расчет технических средств и технологических нормативов работы сортировочной станции: метод. указания / А. Э. Александров [и др.]. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 49 с.
6. Алексеев В. Е., Захарова Д. В. Теория графов: учебное пособие. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. 119 с.
7. Кувайскова Ю. Е. Алгоритмы дискретной математики: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 99 с.
8. Зингаро Д. Алгоритмы на практике. СПб.: Питер, 2023. 432 с.
9. Когабаев Н. Т. Дискретная математика и теория алгоритмов: учебное пособие. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2023. 126 с.
10. Тимухина Е. Н., Аманов М. М. Метод анализа иерархий при определении приоритетности «подъема» грузовых поездов // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 2. С. 97–101.

Дата поступления: 17.03.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

ТИМУХИН Кирилл Максимович —
кандидат техн. наук, доцент; KTimuhin@usurt.ru

АМАНОВ Максим Маратович —
аспирант;
MAmanov@usurt.ru

Selection of a Dislocation Station for Trains Set Aside from Traffic as a Tool for Improving the Efficiency of the Transport System

K. M. Timukhin, M. M. Amanov

Ural State University of Railway Transport, 66 Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, Russia

For citation: *Timukhin K. M., Amanov M. M.* Selection of a Dislocation Station for Trains Set Aside from Traffic as a Tool for Improving the Efficiency of the Transport System // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 341–348. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-341-348 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop a methodology for selecting dislocation stations for trains set aside from traffic, taking into account capacity, technical equipment, and minimal deviation from the freight train route to ensure uninterrupted functioning of railway infrastructure under conditions of high load on transport system elements. **Methods:** the theoretical basis of the study included analysis of operational work of railway stations and sections, and mathematical modeling of transport processes. To formalize the problem of selecting dislocation stations, graph theory was applied, allowing the representation of the operational area as a weighted directed graph. Minimum costs for determining dislocation stations are proposed to be calculated using Dijkstra's algorithm. **Results:** a multi-criteria optimization problem for selecting a dislocation station was formulated and solved. A mathematical model for selecting a dislocation station is proposed, including a system of constraints on the technical equipment of the station and the reserve capacity of hauls. **Practical importance:** application of the proposed methodology will allow finding the shortest routes to dislocation stations for temporary setting aside of freight trains, considering given constraints. The developed solution will increase the efficiency of the transport network, reduce the carrier's operating costs, and minimize risks of violating cargo delivery deadlines. Implementation of the proposed approach will create conditions for forming a controlled "buffer" of set-aside trains, preventing paralysis of stations and sections and ensuring sustainability of the transportation process under infrastructure limitations.

Keywords: Freight trains set aside from traffic, cascade effect, dislocation station, capacity, graph theory, Dijkstra's algorithm

References

1. Timukhina E. N., et al. Analiz prichin ostavleniya ot dvizheniya gruzovykh poezdov na poligone Sverdlovskoy zheleznoy dorogi [Analysis of Reasons for Setting Aside Freight Trains from Traffic at the Sverdlovsk Railway Operational Area], *Innovatsionnyy*

transport [Innovative Transport], 2022, no. 4, pp. 45–50. (In Russian)

2. Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. Ratsional'naya tekhnologiya vremennoy ostanovki poezdov ot dvizheniya [Cost-Effective Technology of Temporary Setting Trains Aside from the Traffic], *Vestnik Nauchno-*

issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) [Bulletin of the Railway Research Institute], 2019, vol. 78, no. 1, pp. 3–9. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-1-3-9 (In Russian)

3. Ob utverzhdenii Metodicheskikh rekomendatsiy po oformleniyu OAO “RZhD” zaderzhki vagonov, konteynerov v puti sledovaniya iz-za nepriema ikh zheleznodorozhnoy stantsiyey naznacheniya po prichinam, zavislyashchim ot gruzopoluchateley, vladel'tsev ili pol'zovateley zheleznodorozhnykh putey neobshchego pol'zovaniya [On Approval of Methodological Recommendations for JSC “Russian Railways” Registration of Delay of Cars, Containers En Route Due to Non-Acceptance by the Destination Railway Station for Reasons Depending on Consignees, Owners or Users of Non-Public Railway Tracks]: order of JSC “Russian Railways”, no. 558r, dated March 22, 2012 (In Russian)

4. Timukhina E. N., Amanov M. M. Metodika ostavleniya ot dvizheniya i “pod'ema” gruzovykh poezdov [Methodology for Setting Aside and “Lifting” Freight Trains], *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2025, no. 3, pp. 12–18. (In Russian)

5. Aleksandrov A. E., et al. Raschet tekhnicheskikh sredstv i tekhnologicheskikh normativov raboty sortirovochnoy stantsii: metod. ukazaniya [Calculation of Technical Means and Technological Standards of Marshalling Yard Operation: Methodological Guidelines], Ekaterinburg, Ural State University of Railway Transport, 2014, 49 p. (In Russian)

6. Alekseev V. E., Zakharova D. V. Teoriya grafov: uchebnoe posobie [Graph Theory: A Textbook]. Nizhny

Novgorod, *Nizhegorodskiy gosuniversitet [National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod Publ.]*, 2017, 119 p. (In Russian)

7. Kuvayskova Yu. E. Algoritmy diskretnoy matematiki: uchebnoe posobie [Algorithms of Discrete Mathematics: A Textbook], Ulyanovsk State Technical University, 2017, 99 p. (In Russian)

8. Zingaro D. Algoritmy na praktike [Algorithmic Thinking]. Saint Petersburg, *Piter Publ.*, 2023, 432 p. (In Russian)

9. Kogabaev N. T. Diskretnaya matematika i teoriya algoritmov: uchebnoe posobie [Discrete Mathematics and Theory of Algorithms: A Textbook], Novosibirsk State University Publishing and Printing Center, 2023, 126 p. (In Russian)

10. Timukhina E. N., Amanov M. M. Metod analiza ierarkhiy pri opredelenii prioritetnosti «pod'ema» gruzovykh poezdov [Analytic Hierarchy Process in Determining the Priority Of “Lifting” Freight Trains], *Vestnik transporta Povolzh'ya [Bulletin of Transport of the Volga Region]*, 2025, no. 2, pp. 97–101. (In Russian)

Received: March 17, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Kirill M. TIMUKHIN — Associate Professor;
KTimuhin@usurt.ru

Maksim M. AMANOV — Postgraduate Student;
MAmanov@usurt.ru

УДК 629.1.01

Способ уменьшения тормозного пути вагона электропоезда путем усовершенствования конструкции клещевого механизма тормозного устройства

С. Н. Коржов¹, П. А. Поляков², И. А. Яицков¹

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

²Набережночелнинский институт Казанского федерального университета, Россия, 423812, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 68/19

Для цитирования: Коржов С. Н., Поляков П. А., Яицков И. А. Способ уменьшения тормозного пути вагона электропоезда путем усовершенствования конструкции клещевого механизма тормозного устройства // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 349–359. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-349-359

Аннотация

Цель: определить возможность улучшения тормозных характеристик электропоездов путем усовершенствования клещевых механизмов тормозных устройств. **Методы:** сравнение тормозного пути вагонов электропоездов, движущихся на спуске по кривому участку и оснащенных тормозными устройствами с серийными и усовершенствованными клещевыми механизмами. Расчет тормозных характеристик проводился путем имитационного моделирования, созданного в пакете прикладных программ ResurDyne. Проводилась оценка влияния угловых перемещений тормозных колодок на характеристики торможения вагонов электропоездов. **Результаты:** при торможении на кривом участке были выявлены локальные зоны контактирующих площадок в парах «колодка — диск». Установлено, что угловые и линейные перемещения тележек, вызванные перераспределением масс в системах «вагон — тележка — колесная пара» и инерционной нагрузкой вагона, оказывают влияние на локальный контакт в парах «колодка — колесо». Было выявлено, что при движении на спуске на кривом участке крен колесных пар приводит к образованию зазоров между поверхностями колодки и диска с одного из краев колодки. Для увеличения площади контакта в тормозных устройствах и компенсации перераспределения масс между тележками в процессе торможения была усовершенствована конструкция клещевого механизма, обеспечивающая наклон осей колодки. Тормозной путь вагона электропоезда при использовании усовершенствованной конструкции клещевого механизма тормозного устройства был снижен на 43,3%. **Практическая значимость:** показана необходимость уточнения методики оценки тормозных свойств электропоездов при движении на кривых участках пути. Ее корректировка позволит повысить безопасность эксплуатации пассажирских электропоездов. Предложенное усовершенствование тормозного устройства позволит снизить локальный износ колодок, что повысит эффективность торможения и работоспособность тормозного устройства в целом.

Ключевые слова: электропоезд, тормозное устройство, кривой участок пути, усовершенствованный клещевой механизм, тормозной путь

Введение

Нормативные документы, регламентирующие требования к проверке тормозного оборудования, не предполагают методики проведения испытаний проверки систем безопасности

на кривых участках пути. В связи с этим необходимо провести анализ научных исследований, посвященных повышению эффективности тормозного оборудования. Основное внимание научного сообщества, занимающегося этими

вопросами, сосредоточено на колодочных тормозах как наиболее распространенных в железнодорожном транспорте.

В работе [1] была предложена система оценки технического состояния поверхности катания методом бесконтактного теплового контроля поверхности катания и колодочного тормоза грузового подвижного состава. В работе [2] проведены экспериментальные исследования по изучению износа при скользящем контакте «колесо — рельс». В зависимости от дистанции скольжения колеса по рельсу изменялись температура в контакте и характеристики повреждения как рельса, так и колес. В статье [3] выявлено, что проводимые исследования не учитывают дискретный и пространственный подвод теплоты к рабочим поверхностям тормозных дисков. Была выявлена неоднородность проводимых исследований тепловой нагруженности на протяжении 25 лет. В диссертации [4] исследовалось термомеханическое растрескивание ободьев колесных пар и рабочих поверхностей тормозных дисков. В работе [5] предлагалась конструкция тормозного устройства, компенсирующая подвижность колодок при торможении. Данная конструкция обеспечивала поворот тормозного блока с помощью двух шарниров вращения. В статье [6] рассматривались вибрации, вызванные трением в паре «колодка — диск». В работе [7] исследовались тепловая нагруженность и напряженно-деформированное состояние тормозных дисков с различной конфигурацией отверстий на рабочих поверхностях дисков. Для снижения тепловой нагруженности на рабочих поверхностях дисков выполнялись щелевые и смешанные отверстия для снижения турбулизации воздушного потока.

В статье [8] для оценки маневренности подвижного состава создавались трехмерные динамические модели в программе Simpack.

Результаты моделирования показали, что возникающая боковая сила при торможении подвижного состава увеличивала коэффициент схода с рельсов по сравнению с качением без нагрузки. Рыскание колесной пары ограничивалось тормозными колодками, и пятно контакта поверхности катания колеса с рельсом увеличилось по сравнению с качением без нагрузки. Проведенный анализ показал, что моделирование процесса торможения подвижного состава рассматривается либо на уровне системы «подвижной состав — железнодорожный путь», либо на уровне систем «колесо — рельс», «колодка — рельс» и «колодка — диск». В первом случае тормозные усилия задаются функционально и подводятся к осям колесных пар, препятствуя их качению. При этом нет взаимосвязи между характеристиками тормозных устройств на линейные и угловые перемещения кузова и другие элементы подвижного состава. Во втором случае рассматриваемые системы не учитывают влияние колебаний кузова и тележек вагона на процесс образования температурной напряженности распределения контактных нагрузок в указанных парах. В связи с этим фактом необходимо рассмотреть влияние взаимодействия рабочих пар тормозных устройств на тормозные характеристики вагона электропоезда, совершающего экстренное торможение на криволинейном участке. В качестве объектов исследования целесообразно рассмотреть тормозные устройства с серийным и усовершенствованным клещевым механизмом для сравнения характеристик эффективности торможения подвижного состава.

Материалы и методы

Для оценки тормозной эффективности электропоезда на кривых участках проводилось моделирование процесса экстренного торможения двух различных типов тормозных

устройств, оснащенных серийными и усовершенствованными клещевыми механизмами. Усовершенствованные клещевые механизмы предполагали наклон колодок в продольном и поперечном направлениях тележек электропоезда. Для моделирования были разработаны твердотельные модели немоторных тележек электропоездов с тормозными устройствами, оснащенными серийными и усовершенствованными клещевыми механизмами (рис. 1). Имитационное моделирование движения и торможения вагонов электропоездов проводилось с помощью пакетов прикладной программы RecurDyn.

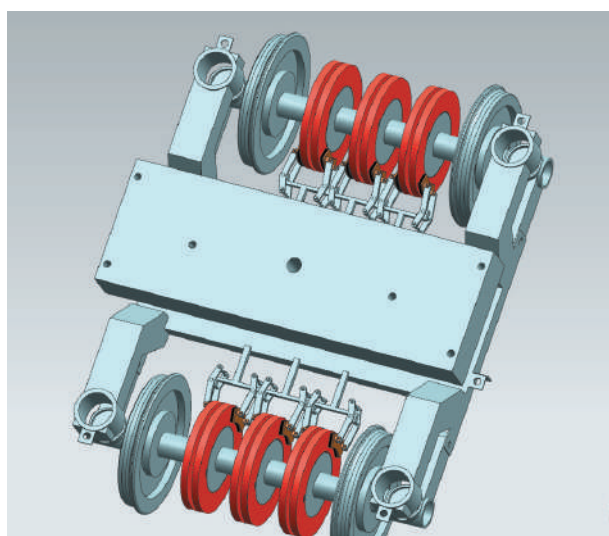
Методика проводимых испытаний предполагала разгон вагона электропоезда до значения установившегося движения (90 км/ч), разворот и экстренное торможение на спуске по кривым участкам. Для достижения вагоном установившейся скорости для тела задавалось выражение подвода крутящего момента на колесные пары, осуществляемого по закону АКISPL (ABS ((VX (1, 2, 1) / 1000 · 3.6)), 0, 3, 0) · MIN (1.0, (InputV_kmph-VX (1, 2, 1) / 1000 · 3.6) · 1.4).

Для имитации движения вагонов электропоезда по кривому участку на кузов вагона действовал крутящий момент, записанный в виде функции $90000000 \cdot (\text{step}(\text{time}, 0, 0, 51, 0) + \text{step}(\text{time}, 51, 0, 52, 1) - \text{step}(\text{time}, 119, 0, 120, 1))$. В результате два исследуемых электропоезда начинали процесс торможения с одинаковых позиций скорости и точки начала тормозного режима (рис. 2).

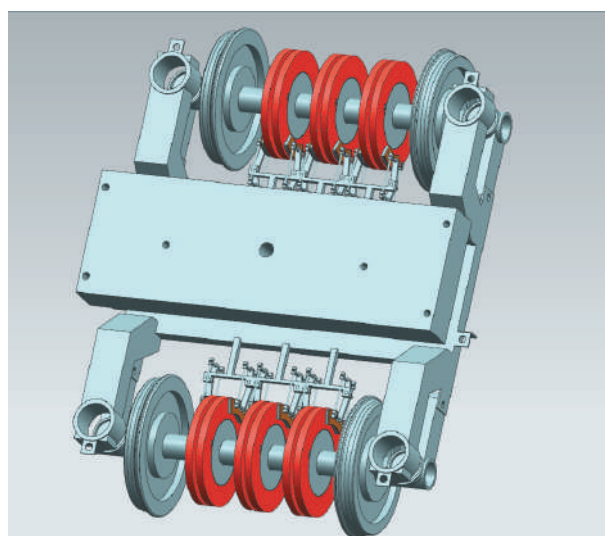
Для реализации тормозного режима на рычаги тормозного устройства прикладывалось идентичное усилие, записанное в виде функций:

- для вагона с серийными клещевыми механизмами $54800 \cdot (\text{step}(\text{time}, 0, 0, 104.88, 0) + \text{step}(\text{time}, 104.88, 0, 105.88, 1))$;
- для вагона с усовершенствованными клещевыми механизмами устройствами $54800 \times (\text{step}(\text{time}, 0, 0, 103, 0) + \text{step}(\text{time}, 103, 0, 104, 1))$.

Величина тормозного усилия выбиралась исходя из передаточного числа в клещевом механизме и величины усилия одной колодки на тормозной диск 21,7 кН (при 0,38 МПа) для тормозного блока 866.00.00.000 как основного



а



б

Рис. 1. Трехмерные модели немоторных тележек электропоездов с тормозными устройствами: с серийными (а) и усовершенствованными (б) клещевыми механизмами

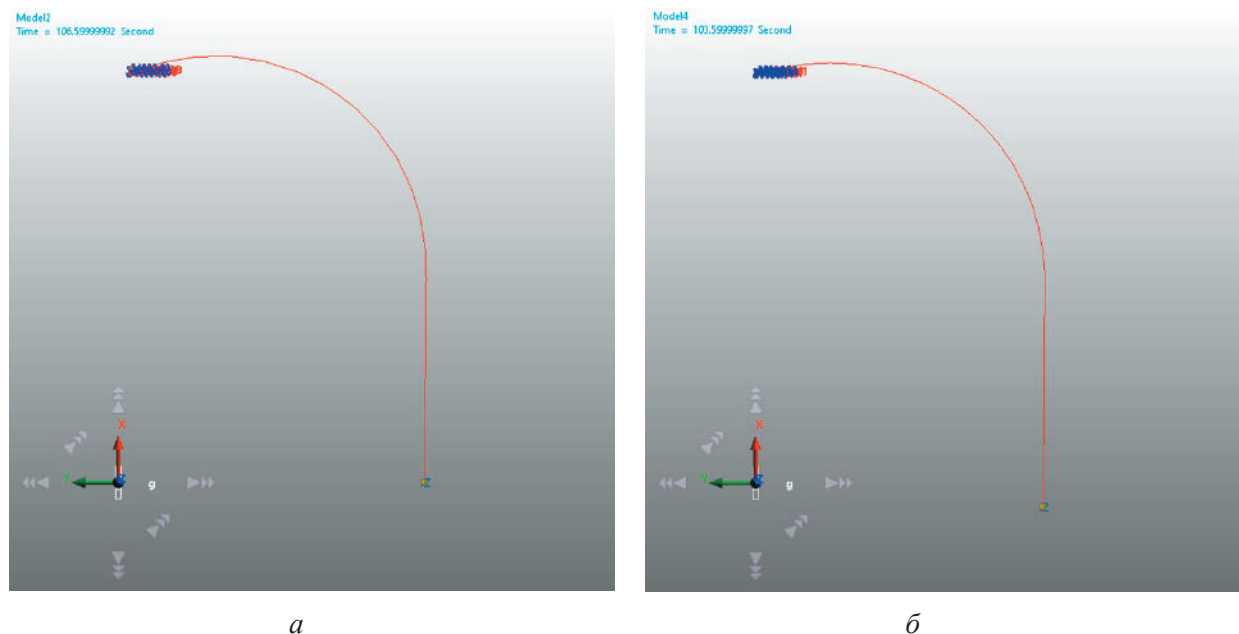


Рис. 2. Моменты и точки начала тормозного режима вагонов электропоездов с тормозными устройствами, оснащенными серийными (*a*) и усовершенствованными (*б*) клещевыми механизмами

прототипа, используемого на современных электропоездах.

Для компенсаций линейных и угловых перемещений колодок относительно рабочих поверхностей тормозного диска в усовершенствованных тормозах использовались актуаторы, корректирующие положения колодок. При имитационном моделировании работа актуаторов задавалась функциями: для передних осей обеих тележек вагона $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 103.5, 0) + \text{step}(\text{time}, 103.5, 0, 104, -42)$; для задних осей обеих тележек вагона $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 103.5, 0) + \text{step}(\text{time}, 103.5, 0, 104, 30)$.

Результатом моделирования являлись диаграммы изменения скоростей и ускорений движения вагонов до полной остановки (рис. 3).

С использованием значений замедлений на отрезках торможения были рассчитаны тор-

мозные пути для двух моделируемых вагонов. Тормозной путь для электропоезда с немоторными тележками, оснащенными серийными клещевыми механизмами (при замедлении $1,27 \text{ м/с}^2$), составил 246 м, а для электропоезда, оснащенного усовершенствованными клещевыми механизмами (при замедлении $0,55 \text{ м/с}^2$), — 568 м. При экстренном торможении путь до полной остановки при применении усовершенствованных клещевых механизмов уменьшился на 43,3 %.

Данный факт достигался за счет эффективного использования площадей рабочих пар тормозных устройств при торможении на кривых участках железнодорожного пути.

Положения колодок по осям колесных пар при торможении на кривом участке железнодорожного пути для вагона электропоезда

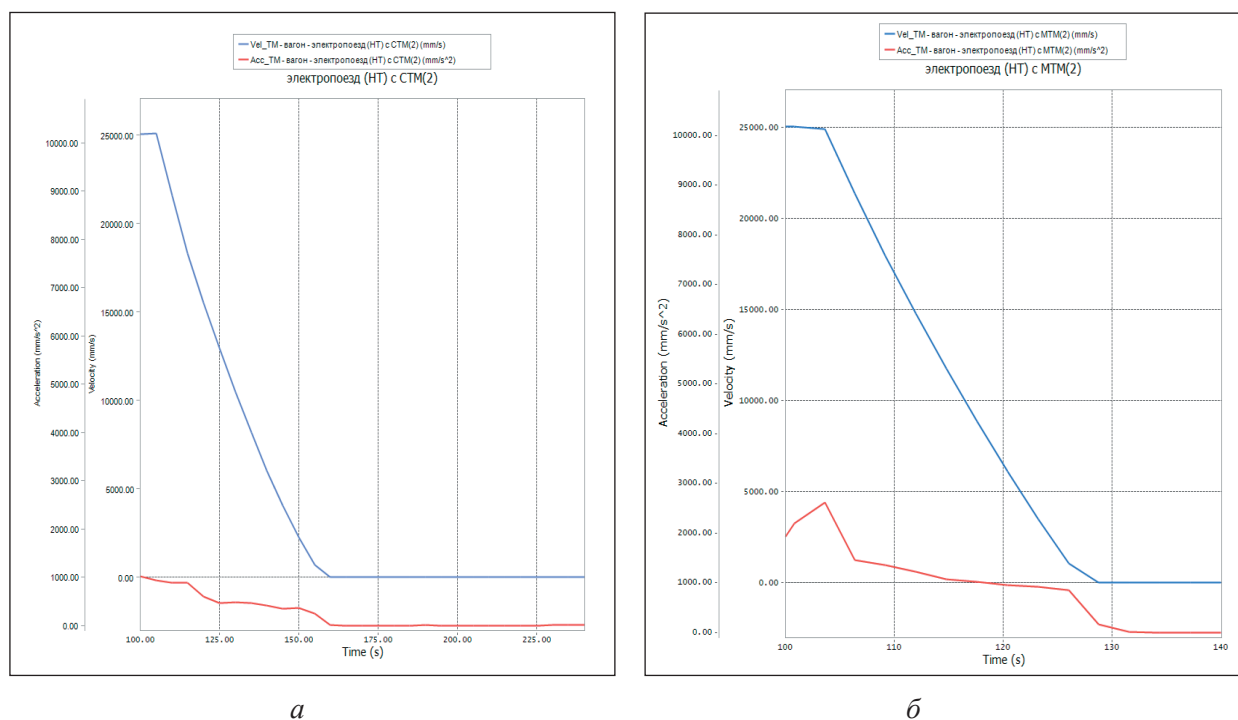


Рис. 3. Изменение скоростей и ускорений кузова вагона электропоездов с неоторными тележками и тормозными устройствами с серийными (а) и усовершенствованными (б) клещевыми механизмами

с серийными клещевыми механизмами представлены на рис. 4.

При прохождении кривого участка оси колесных пар и тележки отклонялись на различные углы, что вызывало локальное соприкосновение колодок с рабочими поверхностями диска. Тормозные устройства, расположенные ближе к внутреннему радиусу поворота, имели меньший зазор между колодками и рабочими поверхностями диска, чем устройства, которые располагались у наружного радиуса. Необходимо отметить, что даже в рамках одного тормозного блока присутствовало смещение контактов в парах «колодка — диск». Левые колодки касаются верхним краем, а правые колодки касаются нижним краем.

В связи с перераспределением нагрузок между тележками одного вагона края колодок тормозных устройств с серийным клещевым механизмом выступали за внешний периметр

тормозных дисков. Передняя тележка являлась наиболее нагруженной, в результате чего клещевой механизм, закрепленный на тележке, опускался под действием сил инерции и нижние края колодок выступали за обод диска. Задняя тележка в процессе торможения, наоборот, разгружалась, что приводило к смещениям клещевого механизма вдоль оси OZ . В результате смещения верхние края колодок выступали за ободья тормозного диска. Угловые и линейные смещения уменьшали площади контакта в парах тормозных устройств, что в итоге отразилось на увеличении тормозного пути при движении по кривым участкам.

На рис. 5 представлены результаты моделирования взаимодействия пар тормозных устройств с усовершенствованными клещевыми механизмами.

Согласно проведенному моделированию, получены следующие результаты: колодки

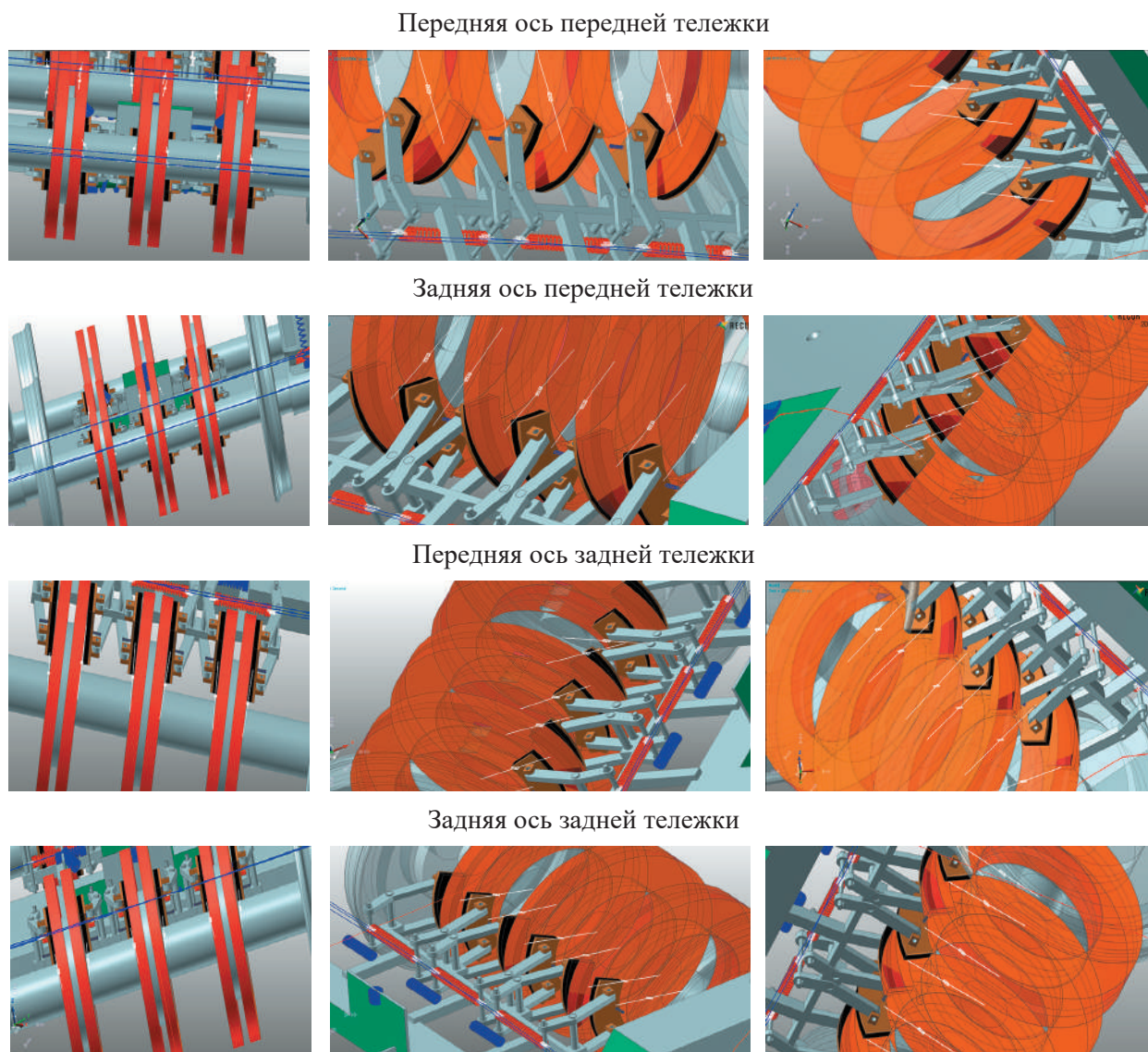


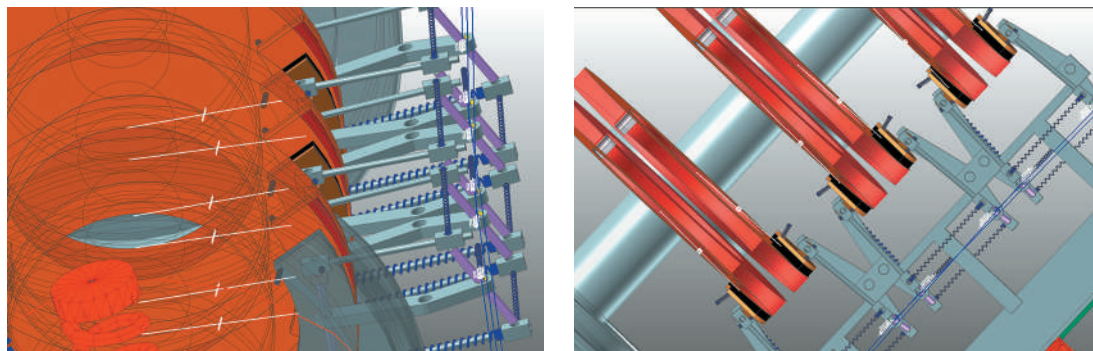
Рис. 4. Положение колодок относительно поверхностей дисков для тормозных устройств с серийными клещевыми механизмами для колесных пар передней и задней немоторных тележек

полностью по всей площади прилегали к рабочим поверхностям диска за счет поворота колодок относительно продольной оси тележек. Зазора между трущимися поверхностями не наблюдалось.

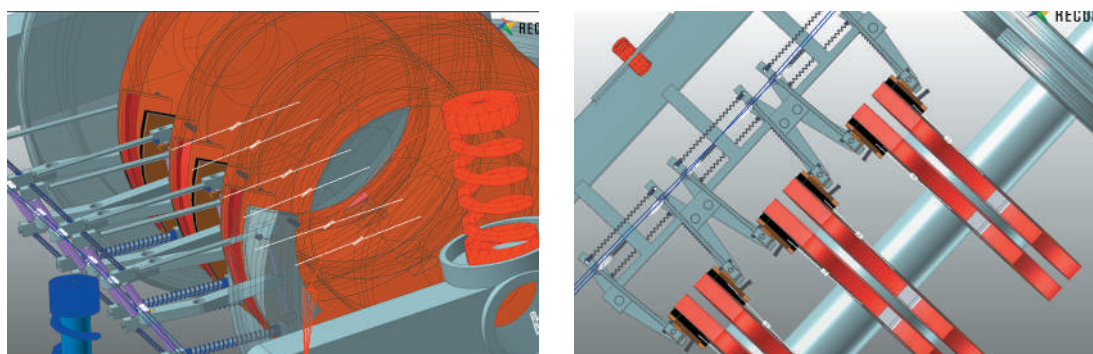
Перераспределение масс между тележками приводило к аналогичным перемещениям клещевых механизмов вместе с тележками. Данные перемещения корректировались с помощью актуаторов, управляющих накло-

ном осей колодок (рис. 6). Тренды изменения углов рыскания передних и задних колодок соответствуют тренду угла рыскания вагона. В интервале с 103,5 до 104 с выполнялась корректировка угла рыскания колодок после прижатия их к рабочим поверхностям диска. В начале прижатия 103 с угол рыскания для передних колодок под действием сил трения изменился с $8,9^\circ$ до $23,54^\circ$, что соответствовало исследованиям

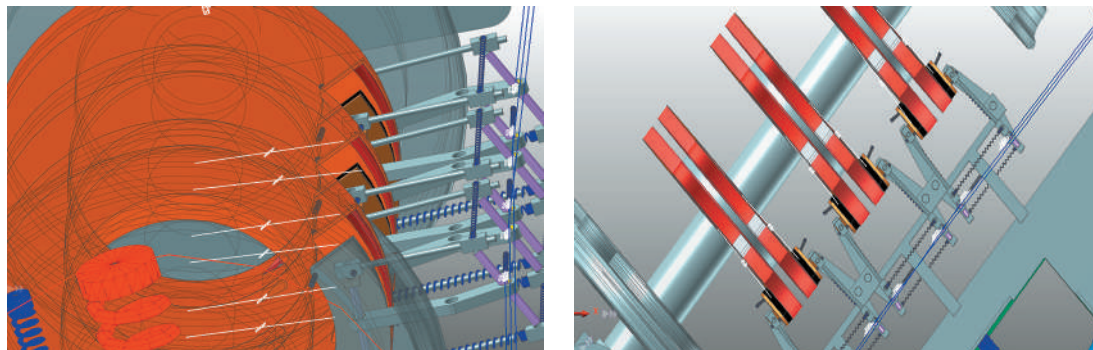
Передняя ось передней тележки



Задняя ось передней тележки



Передняя ось задней тележки



Задняя ось задней тележки

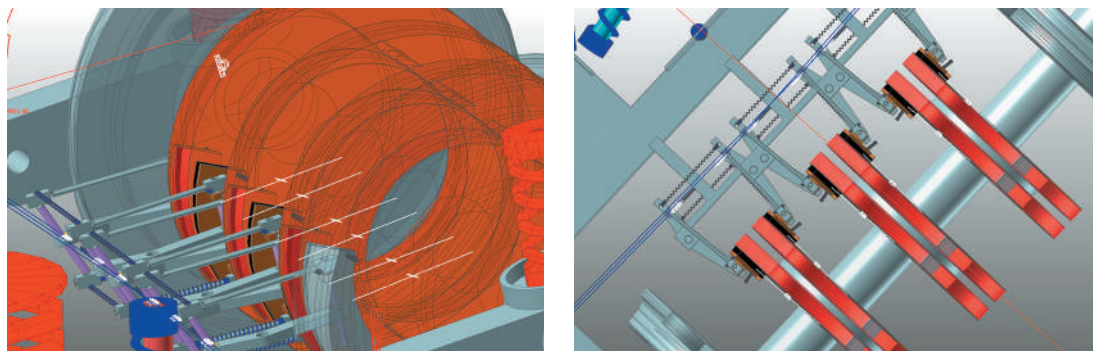


Рис. 5. Положение тормозных колодок относительно поверхностей дисков для тормозных устройств с усовершенствованными клещевыми механизмами немоторных тележек

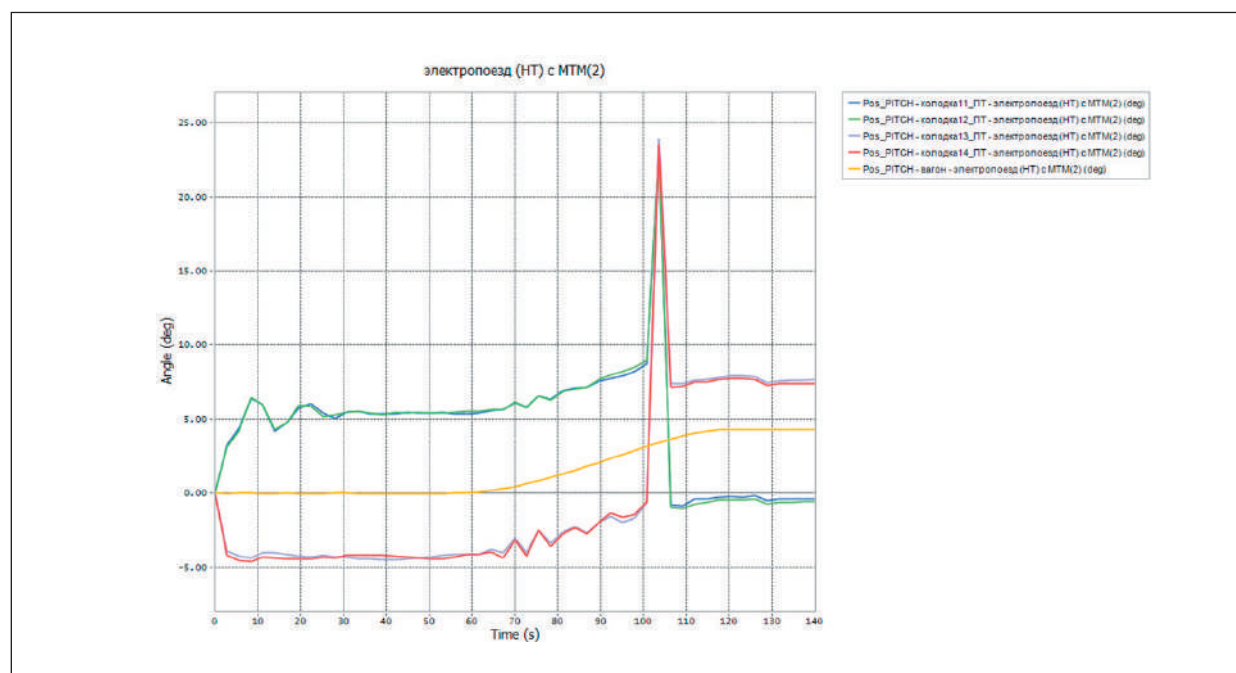


Рис. 6. Изменение углов рыскания вагона и передних колодок (11 и 12) и задних колодок (13 и 14) левого тормозного блока передней тележки вагона электропоезда

по самоустанавливающимся креплениям для накладок тормозных колодок [9]. По завершении корректировки актуаторами угол рыскания для передних колодок снизился с $23,54^\circ$ до $-0,99^\circ$. Для задних колодок процесс взаимодействия, начавшийся с 103 с, изменил угол рыскания с $-0,57^\circ$ до $23,97^\circ$. Процесс корректировки позволил изменить угол рыскания с $23,97^\circ$ до значений $7,18^\circ$.

В результате поворота осей колодок относительно оси OY края колодок не выступали за ободья тормозных дисков, что позволило использовать всю площадь колодки эффективно.

Заключение

Тормозное оборудование электропоездов является одним из контуров системы безопасности всего подвижного состава, усовершенствование которого непосредственно влияет на безопасность транспортного процесса.

Для оценки его эффективности необходимо использовать как характеристики процесса торможения в целом всего состава, так и косвенные параметры, характеризующие работу отдельного узла или детали тормозного оборудования. В статье рассматривалось имитационное моделирование твердотельных моделей вагонов электропоездов с немоторными тележками и тормозными устройствами с различными конструкциями клещевых механизмов при торможении на спуске на кривых участках пути.

В качестве объектов исследования использовались модели серийных тормозных устройств дисково-колодочного типа, устанавливаемые на электропоездах ЭС2Г, и тормозные устройства с усовершенствованными клещевыми механизмами, обеспечивающими наклон колодки в продольном и поперечном направлениях. Моделирование процесса торможения на кривом участке вагона с тормозными

устройствами с серийными клещевыми механизмами показало, что крен колесных пар и крен рамы тележки неравны из-за отсутствия жесткой связи между ними, в результате чего между колодками и рабочими поверхностями диска образовывались зазоры с различных краев колодки. Величины зазора различались между тормозными блоками одной оси колесной пары.

При прохождении кривого участка с поворотом налево в рамках одного тормозного блока левая колодка контактировала с поверхностью диска верхним краем, а правая — нижним краем. Перераспределение масс при торможении оказывало влияние на положение колодок относительно поверхностей диска. На передней тележке нижние края колодок выступали за ободья тормозных дисков передней и задней колесных пар, для задней тележки выступающими краями являлись верхние. При моделировании процесса торможения вагона с тормозными устройствами с усовершенствованными клещевыми механизмами зазора между колодками и рабочими поверхностями дисков не было. В результате крен колесных пар компенсировался наклоном осей колодок в поперечном направлении. Для компенсации перераспределения масс и действия инерционной нагрузки углы рыскания колодок корректировались с помощью актуаторов, установленных на осях приводов клещевого механизма. По результатам моделирования применение усовершенствованной конструкции клещевого механизма позволило сократить тормозной путь на 43,3%.

Список источников

1. Шалупин П.И. Совершенствование диагностического обеспечения бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов грузового подвижного состава на основе имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Уральский государственный университет путей сообщения. Екатеринбург, 2021. 20 с.
2. Research On Wheel/Rail Contact Surface Temperature and Damage Characteristics During Sliding Contact of a Wheel / Y. Wei [et al.] // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024. No. 71. 201 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00540-5>
3. Deressa K.T., Ambie D.A. Thermal Load Simulations in Railway Disc Brake: A Systematic Review of Modelling Temperature, Stress and Fatigue // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. No. 29. Pp. 2271–2283. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09662-y>
4. Mandeep S.W. Mechanical Braking Systems for Trains. A Study of Temperatures, Fatigue and Wear by Experiments and Simulations. Thesis For the Degree of Doctor of Philosophy in Solid and Structural Mechanics. 2019. 31 p.
5. Дисковый тормоз транспортного средства подвижного состава железных дорог: патент на изобретение, RU 2390449 C2; заявка № 2008100648/11; опубл. 27.05.2010.
6. Lorang X., Chiello O. Stability and Transient Analysis in the Modelling of Railway Disc Brake Squeal // *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems* / B. Schulte-Werning [et al.] // *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. 2008. Vol 99. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74893-9_63
7. Simulation and Optimization of Train Brake Disc Based on Coupling Characteristics of FEM and Thermal Flow Density Method / G. Qi [et al.] // *Scientific Reports*. 2025. No. 15. P. 40617. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24247-6>
8. Assessment of the curving performance of heavy haul trains under braking conditions / L. Yang [et al.] // *Journal of Modern Transport*. 2015. Vol. 23. Pp. 169–175. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0075-1>

9. Friction-Induced Stick-Slip Vibration Behavior in High-Speed Train Friction Brake with Triangularly Supported Blocks / G. Liu [et al.] // *Nonlinear Dynamics*. 2025. Vol. 113. Pp. 21013–21050. URL: <https://doi.org/10.1007/s11071-025-11298-7>

Дата поступления: 18.03.2026

Решение о публикации: 21.04.2026

Контактная информация:

КОРЖОВ Сергей Николаевич — аспирант;
ksn@engcenter.ru

ПОЛЯКОВ Павел Александрович —
доктор техн. наук, доцент;
polyakov.pavel88@mail.ru

ЯИЦКОВ Иван Анатольевич — доктор техн. наук,
профессор; yia@rgups.ru

A Method of Reducing the Braking Distance of an Electric Train Car by Improving the Design of the Clamping Mechanism of the Braking Device

S. N. Korzhov¹, P. A. Polyakov², I. A. Yaitskov¹

¹Rostov State Transport University, 2 Rostovskogo strelkovogo polka narodnogo opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

²Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, 68/19 Mira ave., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia

For citation: *Korzhov S.N., Polyakov P.A., Yaitskov I.A. A Method of Reducing the Braking Distance of an Electric Train Car by Improving the Design of the Clamping Mechanism of the Braking Device // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 349–359. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-349-359 (In Russian)*

Abstract

Objective: to determine the possibility of improving the braking characteristics of electric trains by improving the clamping mechanisms of braking devices. **Methods:** comparison of the braking distance of electric train wagons moving downhill along a curved section equipped with brake devices with serial and improved pincer mechanisms. The braking characteristics were calculated using simulation modeling created in the RecurDyne application software package. The influence of angular movements of the brake pads on the brake characteristics of electric train cars was evaluated. **Results:** when braking on a curved section, local areas of contact pads in “pad — disc” pairs were identified. It has been established that angular and linear movements of trolleys caused by the redistribution of masses in the “wagon — cart — wheelset” systems and the inertial load of the wagon affect the local contact in the “shoe — wheel” pairs. It was found that when driving downhill on a curved section, the roll of the wheelsets leads to the formation of gaps between the surfaces of the shoe and the disc from one of the edges of the shoe. To increase the contact area in the braking devices and compensate for the redistribution of masses between the trolleys during braking, the design of the pincer mechanism has been improved, which ensures the tilt of the shoe axes. The braking distance of the electric train carriage was reduced by 43.3% when using the improved design of the clamping mechanism of the braking device. **Practical importance:** the necessity of clarifying the methodology for evaluating the braking properties of electric trains when driving on curved sections of track is shown. Its adjustment will improve the safety of passenger electric trains. The proposed improvement of the brake device will reduce the local wear of the pads, which will increase the brake efficiency and the performance of the brake device as a whole.

Keywords: electric train, braking device, curved section of track, improved pincer mechanism, braking distance

References

1. Chalupina P.I. Sovershenstvovanie diagnosticheskogo obespecheniya beskontaktnogo teplovogo kontrolya kolodochnykh tormozov gruzovogo podvizhnogo sostava na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Improvement of Diagnostic Support for Non-Contact Thermal Control of Brake Pads of Freight Rolling Stock Based on Simulation Modeling], PhD in Engineering, diss., Yekaterinburg, 2021, 20 p. (In Russian)
2. Wei Y., Han J., Yang T., et al. Research On Wheel/Rail Contact Surface Temperature and Damage Characteristics During Sliding Contact of a Wheel, *Journal of Engineering and Applied Science*, 2024, no. 71, 201 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00540-5>
3. Deressa K.T., Ambie D.A. Thermal Load Simulations in Railway Disc Brake: A Systematic Review of Modelling Temperature, Stress and Fatigue, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, no. 29, pp. 2271–2283 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09662-y>
4. Mandeep S.W. Mechanical Braking Systems for Trains, A Study of Temperatures, Fatigue and Wear by Experiments and Simulations. Thesis For the Degree of Doctor of Philosophy in Solid and Structural Mechanics, 2019, 31 p.
5. Patent no. 2390449, Russian Federation, IPC B61H 5/00, Diskovyy tormoz transportnogo sredstva podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Disc Brake of a Railway Rolling Stock Vehicle], appl. January 9, 2008, publ. July 20, 2009, bul. no. 20. (In Russian)
6. Lorang X., Chiello O. Stability and Transient Analysis in the Modelling of Railway Disc Brake Squeal. In: Schulte-Werning B., et al. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2008, vol. 99. Springer, Berlin, Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-74893-9_63
7. Qi G., et al. Simulation and Optimization of Train Brake Disc Based on Coupling Characteristics of FEM and Thermal Flow Density Method, *Scientific Reports*, 2025, no. 15, 40617. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24247-6>
8. Yang L., et al. Assessment of the Curving Performance of Heavy Haul Trains Under Braking Conditions, *Journal of Modern Transport*, 2015, vol. 23, pp. 169–175. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0075-1>
9. Liu G., et al. Friction-Induced Stic-Slip Vibration Behavior in High-Speed Train Friction Brake with Triangularly Supported Blocks, *Nonlinear Dynamics*, 2025, vol. 113, pp. 21013–21050. URL: <https://doi.org/10.1007/s11071-025-11298-7>

Received: March 18, 2026

Accepted: April 21, 2026

Author's information:

Sergey N. KORZHOV — Postgraduate Student;
ksn@engcenter.ru

Pavel A. POLYAKOV — Dr. Sci. in Engineering;
Associate Professor;
polyakov.pavel88@mail.ru

Ivan A. YAITSKOV — Dr. Sci. in Engineering;
Professor; yia@rgups.ru

УДК 629.423.31

Экспериментальные исследования термомеханических напряжений в асинхронных электродвигателях локомотивов

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Экспериментальные исследования термомеханических напряжений в асинхронных электродвигателях локомотивов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 360–369. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-360-369

Аннотация

Цель: для предупреждения возникновения неисправностей обмоток тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов необходимо изучить процессы термомеханического старения изоляции, а также первичные признаки начала повреждения изоляционного материала обмоток. В данной статье исследование ускоренного старения изоляции проводится на сегментированных обмотках и развертке сердечника. **Методы:** для проведения экспериментов была предложена методика поэтапного выполнения испытаний. На первом этапе проводились предварительные исследования, в рамках которых оценивалась работоспособность и точность измерительного оборудования, калибровались измерительные схемы и тестировалось программное обеспечение системы сбора, передачи, обработки и отображения информации. На втором этапе были проведены эксперименты на лабораторных моделях, представляющих собой специально изготовленные натурные образцы. Третий этап включал эксплуатационные испытания на стенде взаимной нагрузки цеха капитального ремонта ТЭД. **Результаты:** в ходе исследований вычислены радиальная деформация зуба статора, окружная деформация в яме сердечника статора, осевая деформация на задней стенке статора во время нагрева на 100 °С. Полученные данные могут быть использованы для повышения точности тепловых расчетов электрических машин переменного тока. **Практическая значимость:** для обеспечения надежности работы ТЭД крайне важно учитывать тепловые потоки при составлении режимных карт движения поездов и проведении тяговых расчетов. Невыполнение этого требования может привести к перегреву ТЭД, что, в свою очередь, значительно сокращает их срок службы и может вызвать аварийные ситуации.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, изоляция, надежность электрических машин, диагностика тяговых электродвигателей, термомеханическое старение изоляции

Введение

Состояние изоляции определяется множеством параметров, которые можно измерить с помощью штатных средств или в ходе дополнительных испытаний на работающем или отключенном тяговом электродвигателе (ТЭД). Поскольку о долговечности основных компонентов изоляции известно не так много, сложно дать точную оценку их надежности.

Однако на основе результатов физического моделирования можно сделать выводы об отдельных характеристиках изоляционных материалов [1–2].

Цель экспериментальных исследований — изучить процессы термомеханического старения изоляции ТЭД и признаки начала повреждения изоляции. В данной статье исследование ускоренного старения изоляции проводится на

сегментированных обмотках и развертке сердечника. Для проведения экспериментов была предложена методика поэтапного выполнения испытаний.

Основой экспериментальных исследований является приложение к материалу изоляции всех воздействующих на нее факторов в процессе эксплуатации ТЭД [3–5]. В идеальном случае эти факторы должны прикладываться одновременно, однако следует признать, что строгое выполнение этого правила не всегда практически возможно в лабораторных условиях. Более того, одновременное приложение воздействующих факторов сделает экспериментальные исследования недопустимо сложными и дорогостоящими.

Поэтому разработанная методика базируется на результатах циклических испытаний, в которых основным доминирующим фактором старения изоляции ТЭД является температура.

На первом этапе проводились предварительные исследования, в рамках которых оценивалась работоспособность и точность измерительного оборудования, калибровались измерительные схемы и тестировалось программное обеспечение системы сбора, передачи, обработки и отображения информации. Контрольные замеры подтвердили, что измерительный комплекс обеспечивает требуемую точность и может быть использован для экспериментальных исследований изоляции ТЭД.

На втором этапе были проведены эксперименты на лабораторных моделях, представляющих собой специально изготовленные натурные образцы. Полученные результаты позволили внести коррективы в созданные математические модели и окончательно определить технические решения для дальнейших экспериментальных работ.

Третий этап включал эксплуатационные испытания на стенде взаимной нагрузки цеха

капитального ремонта ТЭД сервисного локомотивного депо Твери — структурного подразделения Северо-Западного филиала ООО «ЛокоТех-Сервис» и тепловозе 2ТЭ116-986 секция Б ООО «ТрансОйл», оснащенной системой АСК. Испытания проводились в условиях обычной эксплуатации, без каких-либо ограничений. В ходе этих испытаний уточнялись отдельные параметры, касающиеся изменения температурных режимов работы ТЭД.

Параметры изоляции измерялись при комнатной температуре испытуемого образца и при каждом ее фиксированном значении. Диагностические измерения состояния изоляции проводились в начале исследований после каждых 100 циклов нагрева и после разрушения материала изоляции, когда число циклов составляло менее 500. Это дает возможность определить взаимосвязь между температурой, временем, конструкцией и механической нагрузкой системы электрической изоляции в обмотках.

Ускоренные испытания проводились для увеличения интенсивности воздействия термомеханических напряжений на старение изоляции обмоток и сокращение времени экспериментальных исследований. Результаты ускоренных испытаний часто используются для оценки срока службы изоляции ТЭД при нормальной эксплуатации.

Порядок проведения экспериментальных исследований термомеханических напряжений в сердечнике статора асинхронного электродвигателя

Для изучения деформаций сердечника был выбран статор асинхронного электродвигателя ВА80МВ2 мощностью 2,2 кВт, представленный на рис. 1.

Этот двигатель был оснащен тензометрическими датчиками и термодатчиками, которые

были установлены в наиболее напряженных местах. Выбор этой электрической машины для дальнейшего исследования был обусловлен тем, что она представляет собой типовую конструкцию с хорошо известными характеристиками, такими как геометрия и материалы.

В качестве измерителей деформаций и напряжений были использованы фольгированные константановые тензорезисторы серии Y, обладающие сопротивлением 1000 Ом, диапазоном рабочих температур от -70 до $+200$ °С и температурным коэффициентом сопротивления $1,15 \cdot 10^{-6}$ 1/К.

Два датчика температуры были установлены как можно ближе к тензометрическим датчикам — на наружной стороне сердечника и на вершине зуба. Это было сделано для учета процесса нагрева, поскольку температура на наружной стороне сердечника и на вершине зуба немного отличается.

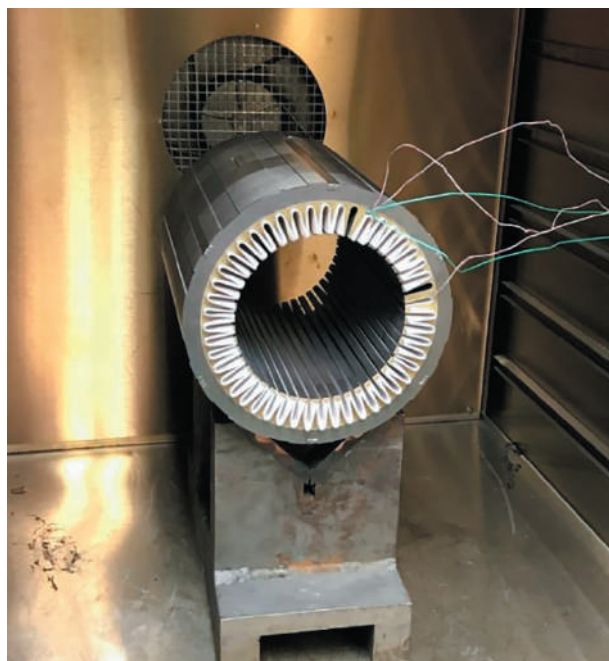


Рис. 1. Установка для исследования деформаций сердечника. Фото: М. А. Шрайбер

Чтобы определить наиболее критические места, где должны быть установлены тензометрические датчики, была создана модель зубцовой зоны [6–8]. На рис. 2 представлено расчетное распределение нормальных напряжений в зубцовой зоне сердечника электродвигателя при установившейся температуре 160 °С. Красная область, расположенная между двумя пазами, выделяется как зона с одной из самых высоких амплитуд приложенного напряжения.

В рамках планируемого эксперимента необходимо измерить градиент температуры и напряжение в этой области, которая на рис. 2 обозначена темно-синим цветом. Здесь были установлены тензометрические датчики и датчики температуры. Поскольку эксперимент носит динамический характер, то есть моделирует деформации, разные части статора будут нагреваться по-разному из-за его геометрии и различной массы в разных местах.

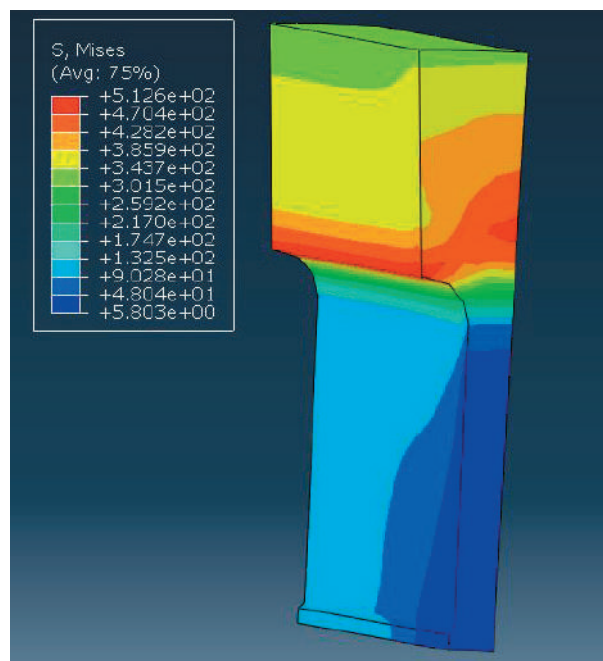


Рис. 2. Установившееся распределение напряжений зубцовой зоны сердечника электродвигателя

В результате геометрические размеры будут изменяться несинхронно.

В конструкции исследуемого объекта существуют две области, где температурные градиенты проявляются особенно ярко: это вершина зуба и задняя часть статора. В связи с этим один тензометрический датчик был размещен на поверхности сердечника, вблизи его верхнего края, а другой — на конце зуба статора. Такая конфигурация позволяет проводить измерения деформации как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях, что наглядно представлено на рис. 3.

В завершение процедуры установки тензометрических датчиков последний из них закрепляется на задней стороне сердечника статора с целью регистрации продольной деформации. Статор был помещен в печь, где его начальная температура составляла приблизительно $20\text{--}22^\circ\text{C}$. В ходе исследования были изучены три различных установившихся температурных режима и процесс нагрева между ними. Для этого печь вместе со статором нагревали в нескольких отдельных экспериментах до достижения установившихся режимов нагрева, которые составляли 50 , 100 и 150°C .

Испытательный стенд, разработанный и собранный собственными силами, позволяет воссоздавать и поддерживать требуемые тепловые циклы, контролируя параметры тока, температуру нагрева изоляционного материала и скорость принудительного охлаждения в ходе исследований (рис. 4).

Во время испытаний образец помещается в термошкаф — короб размером $1,5 \times 1,25 \times 0,75$ м, который со всех сторон изолирован минеральной ватой толщиной $0,045$ м и окружен внешним слоем алюминиевой фольги, что способствует снижению потерь теплоты за счет радиации. Для ускорения процесса охлаждения образцов термошкаф оснащен вентилятором.

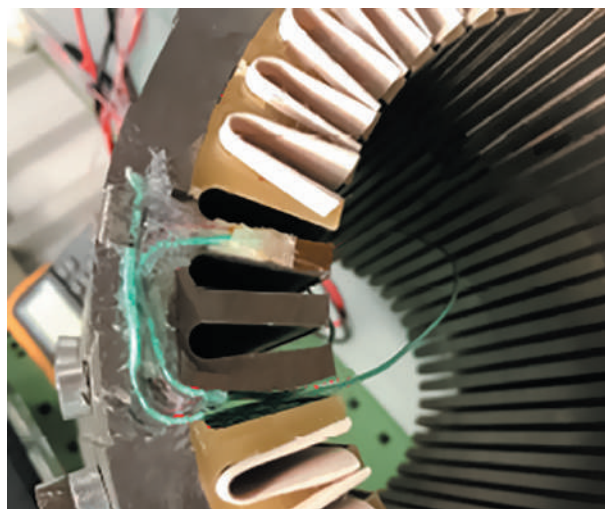


Рис. 3. Расположение тензометрических датчиков в зубцовой зоне статора.

Фото: М. А. Шрайбер

Логическая схема испытательного стенда, предназначенного для автоматизированного тестирования изоляции, требует настройки минимальной и максимальной температур нагрева, а также общего количества циклов, которые необходимо выполнить.

Циклическая температура достигается за счет управления электрическим током, протекающим по проводникам обмотки, и принудительного воздушного охлаждения, которое обеспечивается специально разработанным терморегулятором. Из-за ограничений используемого оборудования рабочие напряжение и ток на испытательном стенде были установлены на уровне 150 В и 40 А.

Для большей реалистичности медный проводник в этой установке выступает в роли источника теплоты, которая передается через систему электрической изоляции к сердечнику. Это приводит к тепловому расширению образца, что вызывает исследуемые механические напряжения. Нагрузки на электрическую изоляцию могут различаться в зависимости от характера тепловых циклов [9–10]. По сравнению



Рис. 4. Общий вид стенда для исследования изоляции. Фото: М. А. Шрайбер

с тепловым напряжением, создаваемым печью, испытательный стенд обеспечивает более точное распределение температуры, которое достовернее отражает процессы, происходящие в обмотках электрических машин в реальных условиях (рис. 5).

При использовании обмоток электрических машин протекающий по проводникам ток (зеленая линия) генерирует теплоту (красная линия), что приводит к повышению температуры обмотки, которая затем передается от проводников к сердечнику. Процедура испытания с переключением напряжения питания заключается в пропуске тока через обмотки для их нагрева, выдержке в течение 100 с для стабилизации температуры, а затем в охлаждении испытуемого объекта до температуры окружа-

ющей среды и повторной паузе для выравнивания температуры в элементах обмотки.

Для сбора данных в стендовой установке использовались модули Advantech. Всего было задействовано пять модулей с настроенными датчиками. Эти модули взаимодействовали друг с другом и с главным компьютером по шине RS-485.

Пользовательский интерфейс позволял задать желаемые параметры температуры, а также количество циклов повторения для автоматической реализации программы исследования. Также была предусмотрена возможность запуска и остановки программы в любой момент. Графический интерфейс, сбор и регистрация данных были настроены на работу с частотой дискретизации 1 Гц. По завер-

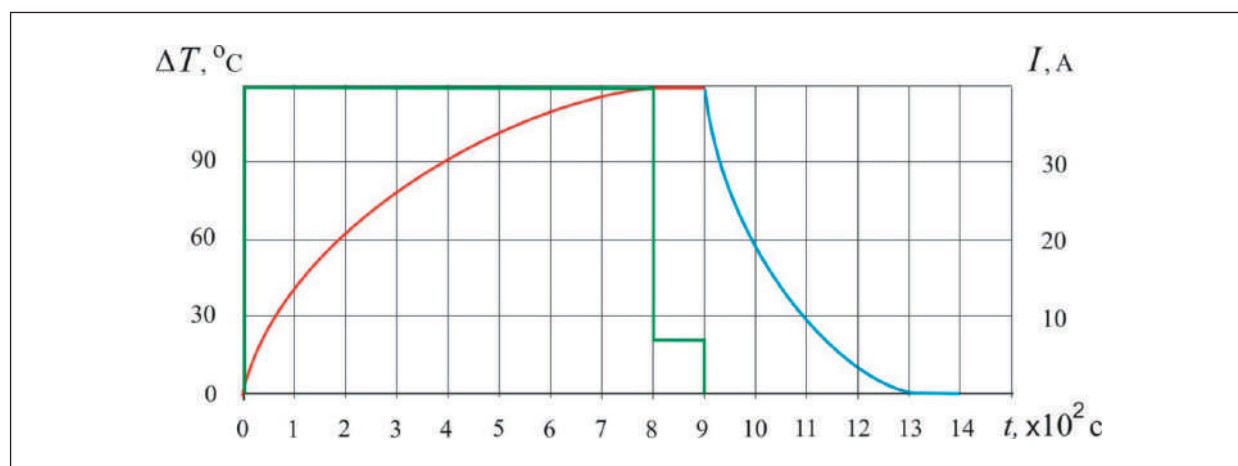


Рис. 5. Параметры цикла нагрева и охлаждения макета обмотки на стенде

шении исследования создавался файл журнала измерений для последующей обработки.

Результаты экспериментальных исследований нагрева статора

Далее приведены данные расчетных и измеренных значений температуры и деформаций, вычисленных с помощью разработанной модели в среде SolidWorks, и нагрева статора в печи до 50, 100 и 150 °C.

На рис. 6 показана зависимость изменения температуры нагрева статора как для экспериментальной, так и для имитационной модели, где по оси ординат отложена температура в градусах, а по оси абсцисс — время. Нагрев осуществляется от комнатной температуры до достижения установившейся температуры нагрева — 100 °C. Здесь и далее красная линия представляет экспериментальное изменение исследуемого параметра, а синяя — его расчетное изменение. На рис. 6 красная линия — это измеренное изменение температуры на ярме, синяя линия — это изменение узловой температуры в соответствующем месте на ярме для имитационной модели с течением времени.

Полученные зависимости показывают, что разработанная модель адекватно отображает

происходящие процессы в ходе нагревания сердечника электродвигателя. Максимальное расхождение измеренных и расчетных данных не превышает 7,6%.

Смоделированная и экспериментальная радиальная деформация зуба при изменении температуры нагрева представлена на рис. 7. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются друг с другом. Максимальное расхождение не превышает 4,4%.

На рис. 8 показана окружная/тангенциальная деформация в ярме сердечника для модели и эксперимента.

Максимальное расхождение достигает 8,3%. Это отклонение может быть объяснено результатом сдвига листов сердечника из-за нагрева, которое не учитывалось в разработанной модели.

На рис. 9 показана осевая деформация задней части сердечника статора для моделирования и эксперимента во время нагрева на 50 °C. Осевая длина статора исследуется, чтобы выяснить, является ли она критическим параметром, влияющим на амплитуды напряжений основных компонентов изоляции.

Экспериментальная осевая деформация на задней стенке статора по сравнению

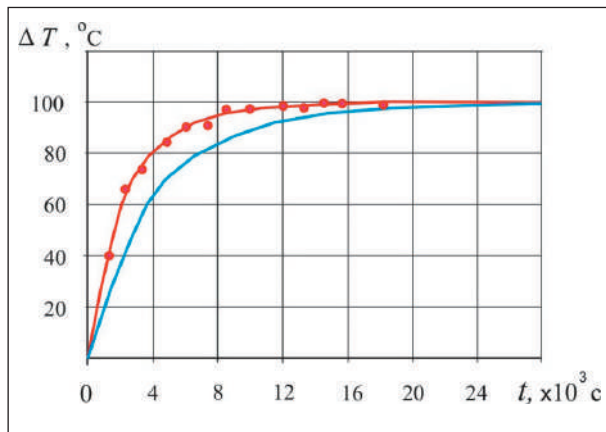


Рис. 6. Расчетное и экспериментальное изменение температуры сердечника во время нагрева на 100 °С

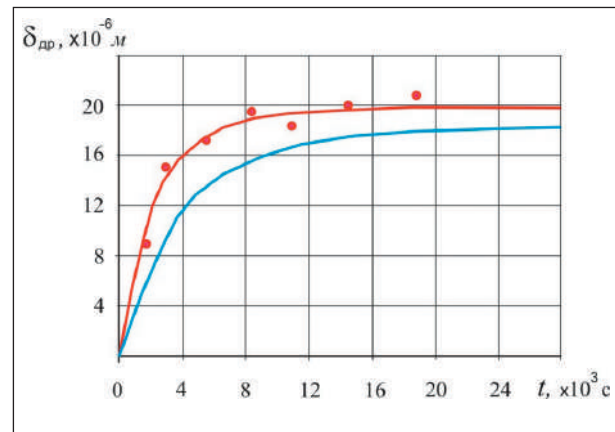


Рис. 7. Смоделированная и экспериментальная радиальная деформация зуба в результате нагрева на 100 °С

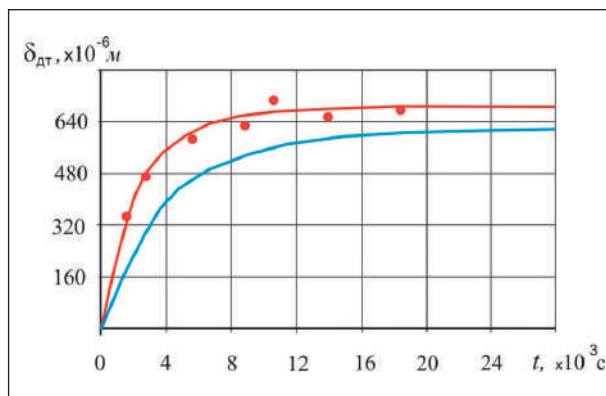


Рис. 8. Смоделированная и экспериментальная окружная деформация в ярме во время нагрева на 100 °С

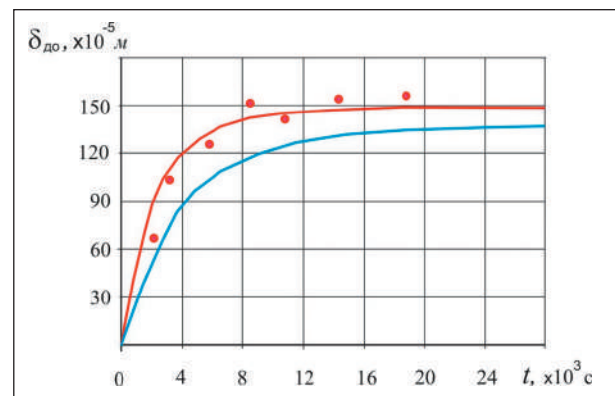


Рис. 9. Смоделированная и экспериментальная осевая деформация на задней стенке статора во время нагрева на 100 °С

с моделированием имеет отклонение, достигающее 11,6% (рис. 9). Как и в предыдущем случае, это можно объяснить тем, что сердечник статора состоит из нескольких сотен стальных листов, изолированных лаком. Это может привести к другому значению коэффициента теплового расширения, который используется в имитационной модели. С учетом того, что данная зона расположена на противоположной стороне сердечника, ее деформация незначительно влияет на величину напряжений в материале изоляции обмотки.

В результате анализа полученных данных установлено, что разработанная твердотелая модель адекватно отражает протекающие процессы и хорошо согласуется с аналитическими выражениями для касательных и нормальных напряжений.

Выводы

1. Был разработан специальный стенд, который позволяет проводить испытания изоляционных материалов на тепломеханические повреждения и диагностировать их параметры

в условиях, приближенных к реальным. В ходе испытаний было проведено 500 циклов нагрева на 100 °С. После каждых 100 циклов нагрева проводились измерения параметров изоляции.

2. Была разработана схема подключения электрических цепей, контура охлаждения и проводных соединений для датчиков, установленных на стенде и залитых внутрь экспериментальной обмотки. Для обеспечения независимого и автоматизированного процесса испытаний была создана система автоматического управления работой испытательного стенда и сбора информации.

3. В результате испытаний были изучены важные характеристики элементов электрической машины, изменение которых может стать предпосылкой к возникновению отказа. К таким характеристикам относятся осевые и окружные деформации сердечника статора.

4. Практика убедительно показала, что для обеспечения надежности работы ТЭД крайне важно учитывать тепловой поток при составлении режимных карт движения поездов и проведении тяговых расчетов. Невыполнение этого требования может привести к перегреву ТЭД, что, в свою очередь, значительно сокращает срок их службы и может вызвать аварийные ситуации.

Список источников

1. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галушко [и др.]. М.: Энергия, 1979. 175 с.
2. Исмаилов Ш.К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава: монография. Омск, 2007. 391 с.
3. Кьюнг Л.К., Лурье С.А., Дудченко А.А. Об оценке трещиностойкости при межслойном разрушении слоистых композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18, № 1. 2012. С. 83–91.

4. 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.

5. Шрайбер М.А. Развитие остаточных напряжений в изоляции тяговых электродвигателей при отверждении пропиточного состава // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 35–40.

6. Киселев И.Г., Курилкин Д.Н., Шрайбер М.А. Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, № 4. С. 460–468.

7. Курилкин Д.Н., Романова А.А., Шрайбер М.А. Моделирование механических напряжений в обмотках тяговых электродвигателей тепловозов. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2021. № 2. С. 46–48.

8. Шрайбер М.А. Моделирование воздействия неоднородности материала изоляции тяговых электрических машин на процессы роста усталостных трещин // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 3 (99). С. 42–45.

9. Шрайбер М.А. Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 2. С. 242–248.

10. Шрайбер М.А. Исследование усталостного старения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов при циклической нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 4. С. 27–35.

Дата поступления: 07.04.2026

Решение о публикации: 01.05.2026

Контактная информация:

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

Experimental Studies of Thermomechanical Stresses in Locomotive Asynchronous Electric Motors

M. A. Shrajber

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

For citation: *Shrajber M.A.* Experimental Studies of Thermomechanical Stresses in Locomotive Asynchronous Electric Motors // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 360–369. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-360-369 (In Russian)

Abstract

Purpose: to prevent faults in the windings of locomotive traction electric motors (TEMs), it is necessary to study the processes of thermomechanical aging of the insulation, as well as the initial signs of damage to the insulation material of the windings. In this article, the accelerated aging of the insulation is studied on segmented windings and core scans. **Methods:** a step-by-step test methodology was proposed for conducting experiments. In the first stage, preliminary studies were conducted to assess the performance and accuracy of the measuring equipment, calibrate the measurement circuits, and test the software of the information collection, transmission, processing, and display system. In the second stage, experiments were performed on laboratory models, which were specially designed prototypes. The third stage involved operational tests on the mutual load bench in the TED overhaul workshop. **Results:** in the course of research calculated the radial deformation of the stator tooth, the circumferential deformation in the stator core yoke, and the axial deformation on the rear wall of the stator during heating by 100 °C. The data obtained can be used to improve the accuracy of thermal calculations for AC electric machines. **Practical significance:** to ensure the reliability of the TED operation, it is extremely important to consider the heat flows when drawing up the train movement mode maps and conducting traction calculations. Failure to comply with this requirement can lead to overheating of the TED, which in turn significantly reduces their service life and can cause accidents.

Keywords: traction electric motors, insulation, reliability of electric machines, diagnostics of traction electric motors, thermomechanical aging of insulation

References

1. Galushko A.I., et al. Nadezhnost' izolyatsii elektricheskikh mashin [Reliability of the Insulation of Electric Machines], Moscow, Energy Publishing, 1979, 175 p. (In Russian)
2. Ismailov Sh.K. Povyshenie resursa izolyatsii elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava: monografiya [Increasing the Resource of the Insulation of Electric Machines of Rolling Stock: A Monograph], Omsk, 2007, 391 p. ISBN 5-94941-039-4 (In Russian)
3. K'yung L.K., Lur'e S.A., Dudchenko A.A. Ob otsenke treshchinostojkosti pri mezhslonnom razrushenii sloistykh kompozitov [On the Assessment of Crack Resistance in Interlayer Fracture of Layered Composites], *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksij* [Mechanics of Composite Materials and Structures], 2012, vol. 18, no. 1, pp. 83–91. (In Russian)
4. Dudkin A.N., Kim V.S., Mar'in S.S. Issledovanie vnutrennikh mekhanicheskikh napryazhenij v propitochnykh i zalivochnykh lakakh [Research of Internal Mechanical Stresses in Impregnating and Pouring Varnishes], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceeding of Tomsk Polytechnic University], 2005, vol. 308, no. 7, pp. 171–174. ISSN 1684-8519 (In Russian)
5. Shrajber M.A. Razvitie ostatochnykh napryazhenij v izolyatsii tyagovykh elektrodvigatel'ej pri otverzhdenii propitochnogo sostava [Development of

Residual Stress in the Insulation of Traction Electric Motors During the Curing of the Impregnation Composition], *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2024, no. 1 (80), pp. 35–40. (In Russian)

6. Kiselev I.G., Kurilkin D.N., Shrajber M.A. Teplovaya model' asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya teplovoza [Thermal Model of an Asynchronous Traction Electric Motor of a Diesel Locomotive], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 460–468. (In Russian)

7. Kurilkin D.N., Romanova A.A., Shrajber M.A. Modelirovanie mekhanicheskikh napryazhenij v obmotkakh tyagovykh elektrodvigatelyj teplovozov [Modeling of Mechanical Stresses in the Windings of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives], *Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Electronics and Electrical Equipment of Transport]*, 2021, no. 2, pp. 46–48. (In Russian)

8. Shrajber M.A. Modelirovanie vozdejstviya neodnorodnosti materiala izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin na protsessy rosta ustalostnykh treshchin [Modeling the Effect of Heterogeneity of the Insulation Material of Traction Electrical Machines

on the Growth of Fatigue Cracks], *Vestnik Transporta Povolzhya [Bulletin of transport of the Volga region]*, 2023, no. 3 (99), pp. 42–45. (In Russian)

9. Shrajber M.A. Vliyanie termomekhanicheskoy nagruzki na starenie izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelyj teplovozov [Influence of Thermo-mechanical Load on the Aging of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 242–248. (In Russian)

10. Shrajber M.A. Issledovanie ustalostnogo stareniya izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelyj teplovozov pri tsiklicheskoj nagruzke [Research of the Fatigue Aging of the Traction Electric Motors of Diesel Locomotives under Cyclic Load], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2023, no. 4, pp. 27–35. (In Russian)

Received: April 07, 2026

Accepted: May 01, 2026

Author's information:

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

УДК 656.222

Моделирование движения поездов на основании анализа статистических данных

Д. В. Язев¹, В. В. Костенко¹, А. Н. Иванков²

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

²ООО «ПСК ТехПроект», Россия, 107140, Москва, Красносельский 3-й пер., 21, стр. 1

Для цитирования: Язев Д. В., Костенко В. В., Иванков А. Н. Моделирование движения поездов на основании анализа статистических данных // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 370–380. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-370-380

Аннотация

В статье рассматриваются особенности моделирования движения поездов с уточнением результатов тяговых расчетов. **Цель:** модификация уравнения движения поезда с учетом случайных факторов на основании обработанных статистических данных для использования в динамических моделях. **Методы:** математическое моделирование, теория вероятностей, методы Эйлера, Рунге — Кутты. Проверяются статистические гипотезы о принадлежности данных регистрации реальных поездов и данных, полученных моделированием, к одной генеральной совокупности. **Результаты:** в ходе анализа статистических данных, полученных с кассет регистрации и скоростемерных лент, предлагается уточнить существующее уравнение движения корректирующими коэффициентами, полученными эмпирическим путем. Выдвигается гипотеза о принадлежности статистических и расчетных данных к одной генеральной совокупности. **Практическая значимость:** в результате подтверждения гипотезы модифицированное уравнение движения возможно использовать при моделировании движения потока поездов с различными динамическими характеристиками, в том числе при приеме и отправлении на станциях, а также определить фактические значения станционных и межпоездных интервалов.

Ключевые слова: уравнение движения поезда, тяговые расчеты, динамика движения поезда, математическое моделирование, прибытие на станцию

Введение

При планировании поездной работы, составлении графика движения поездов, определении лимитирующих элементов пропускной способности и решении многих других научно-технических задач не всегда достаточно упрощенного представления движения грузового поезда линией $s = f(t)$ на основании средних значений скорости движения по перегону и на участках разгона и торможения. При необходимости детализации описания процесса движения обычно применяют тяговые расчеты, а также специализированное программное

обеспечение по их автоматизации, например, «ИСКРА-ПТР», «ЭРА-ТЭП», МСУ, КОРТЭС и т. п. [1–4].

Но необходимо понимать, что фактическое движение поездов заметно отличается от теоретического. Тяговые расчеты дают идеальный случай, по которому поезд может проследовать с учетом всех параметров и ограничений, предлагаемых методиками тяговых и тормозных расчетов. При этом не учитывается влияние на динамику движения поезда многочисленных внешних, зачастую случайных факторов, таких как:

- опытность машиниста;
- техническое состояние локомотива и вагонов;
- распределение вагонов разной массы по составу;
- погодные условия;
- расположение разделительных стрелок на маршрутах и пути приема и отправления поезда;
- оперативные задачи, поставленные перед машинистом поездным диспетчером и дежурным по станции и т. п.

В ряде случаев учет этих факторов не важен, так как в графиках движения на основании опытных поездок заложен запас времени. Но в последние годы существует тенденция повышать пропускную способность участков за счет использования эксплуатационных резервов. Такие возможности появились в связи с новыми системами автоматической блокировки, которые позволяют снизить межпоездные интервалы на перегонах в грузовом движении до 5–6 минут [5]. Таким образом, расчетная пропускная способность, определенная в соответствии с методикой [6], повышается, но это повышение не подтверждается практикой. Даже минимальные задержки одного из поездов, следующих в потоке на межпоездном интервале, вызывают цепную реакцию замедления всего потока. Наиболее сложный случай представляют собой стыки перегонов и станций. Наблюдаются многочисленные случаи, когда пропускная способность станций не позволяет обеспечить интервал попутного прибытия или отправления, соответствующий межпоездному интервалу автоблокировки на прилегающих перегонах [7–9].

В связи с этим при построении моделей движения поездов в потоке, соответствующих реальной ситуации, необходимо использовать реальные времена хода, а также фактические

зависимости вида $v = f(s)$, с разбивкой на элементы по 5–20 м.

Цели и задачи

Целью данной работы является уточнение уравнения движения поезда для моделирования его динамики с учетом случайных факторов на основании статистических данных. Для ее достижения решены следующие задачи: сбор и статистическая обработка данных кассет регистрации и скоростемерных лент, исследование составляющих уравнения движения поезда, подбор уточняющих коэффициентов, проверка гипотезы о принадлежности статистических и теоретических данных к одной генеральной совокупности. В работе применены методы математического моделирования движения поезда, проверки статистических гипотез.

Анализ статистических данных

Данные о динамике движения грузовых поездов собраны по различным перегонам и станциям Октябрьской железной дороги.

Результаты анализа статистических данных показали, что для дальнейшей обработки данных следует разделить грузовые поезда по весовым категориям на легкие (порожние), весом до 2500 т, средние (среднегруженные) — от 2500 до 4500 т, тяжелые (груженные) — 4500 т и выше. Данная декомпозиция позволяет подобрать параметры нормального распределения скоростей движения поездов в зависимости от скоростных ограничений на участках с незначительными уклонами. Данные результаты проверены на соответствие закону распределения по критерию Лиллиефорса и критерию согласия Пирсона. Кривая плотности вероятности для тяжелых поездов при ограничении 80 км/ч представлена на рис. 1. Также получены зависимости для параметров нормального распределения, представленные на рис. 2 и 3.



Рис. 1. Сравнение фактических данных с теоретическим законом распределения для тяжелых поездов

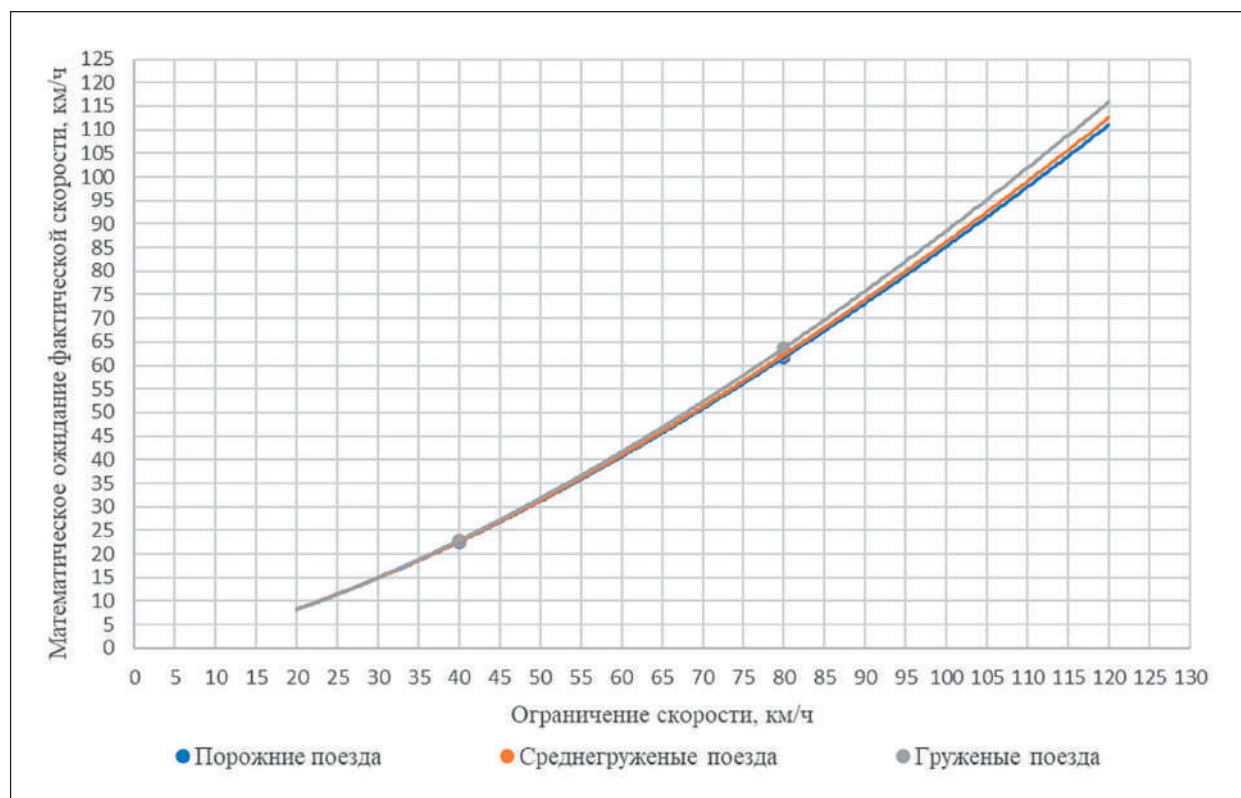


Рис. 2. Зависимость математического ожидания фактической скорости от ограничения и весовой категории грузовых поездов

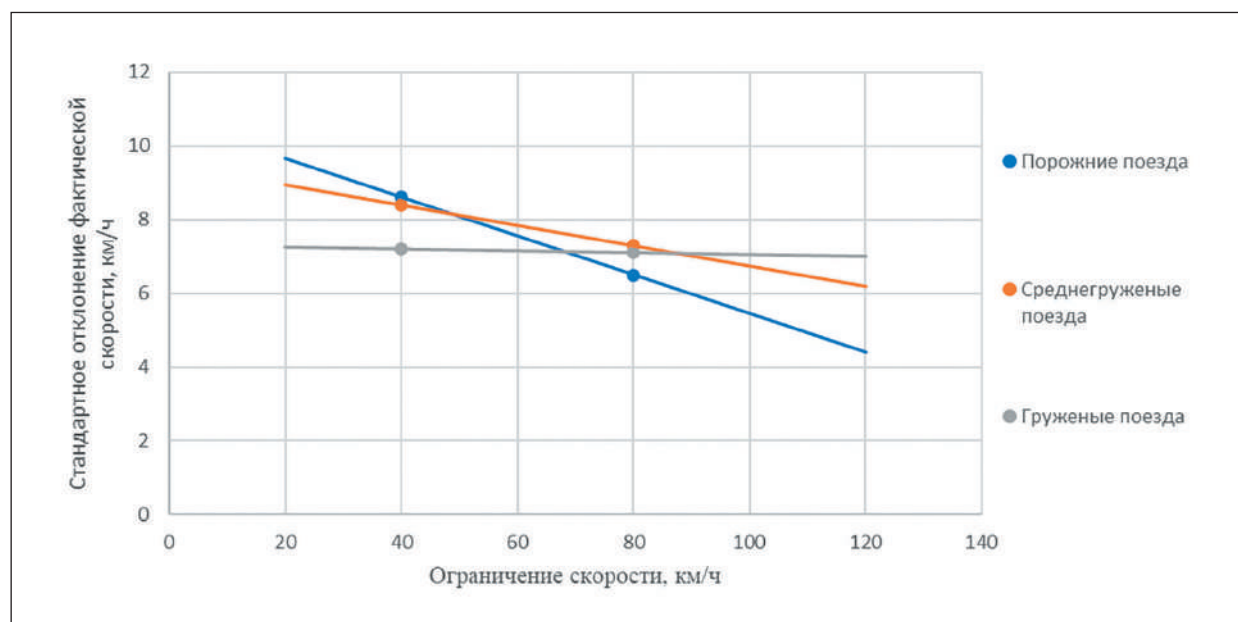


Рис. 3. Зависимость стандартного отклонения фактической скорости от ограничения и весовой категории грузовых поездов

Корректировка уравнения движения поезда

Несмотря на полученные параметры нормального закона распределения, для целого ряда случаев получить отрезки теоретической кривой движения поезда, отражающие реальную динамику, не получится. Прежде всего это касается случаев разгона и торможения и значительных уклонов. Как было сказано ранее, для учета динамики и построения кривых вида $v = f(s)$ возможно применение тяговых расчетов и решение уравнения движения поезда, имеющего следующий вид [10]:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta(f_k - w_k - b_t), \tag{1}$$

где ζ — ускорение поезда в км/ч² при действии удельной ускоряющей силы 1 Н/кН, $\zeta = 120 \text{ км/ч}^2 / (\text{Н/кН})$;
 f_k — удельная сила тяги, Н/кН;
 w_k — удельная сила сопротивления движению, включающая в себя основное сопро-

тивление от локомотива ($w'_{o(x)}$) и вагонов (w''_o), а также дополнительные сопротивления от уклона (w_i) и кривых (w_r), Н/кН:

$$w = \frac{w'_{o(x)}P + w''_oQ_{бр}}{P + Q_{бр}} + w_i + w_r; \tag{2}$$

b_t — удельная тормозная сила, Н/кН;
 P — вес локомотива, т;
 $Q_{бр}$ — вес состава, т.

Однако такой расчет даст идеальные значения, не соответствующие фактическому движению поезда. Следовательно, целесообразно на основе статистических данных провести корректировку рассматриваемого уравнения дополнительными коэффициентами.

В первую очередь необходимо учесть поведение машиниста. Основное воздействие, оказываемое им на движение поезда, осуществляется посредством регулирования силы тяги и применения тормозов поезда. Если считать, что торможение — это по своей сути процесс вынужденного снижения скорости в силу тех

или иных ограничений, то изменение силы тяги связано с регулировочными мероприятиями, направленными на удержание средней скорости, соответствующей графиковому времени хода и изменению скорости при преодолении различных элементов профиля пути. Таким образом, для силы тяги возможно применение коэффициента:

$$k = k_{\text{cp}} + k_{\text{ск}} + k_{\text{укл}}, \quad (3)$$

где k_{cp} — коэффициент, учитывающий движение поезда со средней скоростью, соответствующей графиковому времени хода, при заданном ограничении скорости, серии тягового подвижного состава и весовой категории поезда. Данный коэффициент определен эмпирическим методом для разных типов локомотивов и, например, для локомотива 2ЭС4к составляет:

$$k_{\text{cp}} = (0,0017v_{\text{огр}} - 0,0003) \text{ для Л-категории;}$$

$$k_{\text{cp}} = (0,0018v_{\text{огр}} + 0,0284) \text{ для С-категории;}$$

$$k_{\text{cp}} = (0,002v_{\text{огр}} + 0,0555) \text{ для Т-категории;}$$

где $v_{\text{огр}}$ — ограничение скорости, км/ч,

$k_{\text{ск}}$ — коэффициент, учитывающий плавное переключение позиций контроллера машиниста в зависимости от разности текущей скорости движения и ограничения:

$$k_{\text{ск}} = \begin{cases} k_{\text{cp}} \cdot \frac{v_{\text{cp}} - v}{v_{\text{огр}} - v_{\text{cp}}}, & \text{при } v_{\text{cp}} < v \leq v_{\text{огр}} \\ 0, & \text{при } v_{\text{cp}} = v \text{ или} \\ & \text{при движении на КЖ;} \\ (1 - k_{\text{cp}}) \cdot \frac{v_{\text{cp}} - v}{v_{\text{cp}}}, & \text{при } v_{\text{cp}} > v \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

где v — текущая скорость поезда, км/ч;

v_{cp} — средняя скорость поезда, км/ч. Определяется по эмпирическим зависимостям для поездов различных весовых категорий в зависимости от ограничения скорости:

$$v_{\text{cp}} = 0,108v_{\text{огр}}^{1,449} \text{ для Л-категории;}$$

$$v_{\text{cp}} = 0,105v_{\text{огр}}^{1,457} \text{ для С-категории;}$$

$v_{\text{cp}} = 0,099v_{\text{огр}}^{1,476}$ для Т-категории;

$k_{\text{укл}}$ — коэффициент, учитывающий изменение силы тяги в зависимости от преодолеваемого уклона:

$$k_{\text{укл}} = \begin{cases} 1 - k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}, & \text{при } w_i \geq i_{\text{кр}} \\ (1 - k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}) \cdot \frac{w_i}{i_{\text{кр}}}, & \text{при } i_{\text{кр}} > w_i > 0 \\ 0, & \text{при } w_i = 0 \\ (k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}) \cdot \frac{w_i}{w_0}, & \text{при } 0 > w_i > -w_0 \\ -(k_{\text{cp}} - k_{\text{ск}}), & \text{при } w_i \leq -w_0 \end{cases} ; \quad (5)$$

где w_0 — основное удельное сопротивление движению поезда, Н/кН;

w_i — дополнительное удельное сопротивление движению подвижного состава от приведенного уклона, Н/кН;

$i_{\text{кр}}$ — критический уклон, преодолеваемый поездом на заданной скорости, %.

Помимо этого, в уравнении движения должны учитываться случайные факторы, оказывающие влияние на движение поезда. Для учета случайных отклонений от математического ожидания каждое слагаемое уравнения (1) умножается на соответствующий коэффициент, значение которого задается случайно для каждого поезда.

В результате итоговое уравнение движения поезда примет вид:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (\alpha k f_k - \beta w_k - \gamma b_T), \quad (6)$$

где α — доля использования максимально реализуемой силы тяги с учетом ограничения по сцеплению;

δ — интервал изменения действующей силы сопротивления, зависящий от различных случайных внешних факторов, не учитываемых расчетами;

γ — доля использования тормозной силы от максимально реализуемой;

k — коэффициент использования силы тяги, характеризующий поведение машиниста и зависящий от изменяющихся условий движения.

Для решения данного дифференциального уравнения можно воспользоваться методами Эйлера или Рунге — Кутты [11]. При выполнении моделирования движения поезда используется численное интегрирование с шагом 5 м на рассматриваемом участке пути.

Стоит отметить, что при построении кривой торможения (кроме случаев остановки поезда) конечная скорость в модели должна быть стохастической в силу невозможности точно регулировать тормозную силу при различающихся характеристиках подвижного состава, элементов инфраструктуры и поездной обстановки.

Применимость полученного уравнения

Для проверки применимости полученного уравнения проведено сравнение скоростей,

полученных теоретически, с эмпирическими данными на нескольких рассматриваемых участках в одних и тех же точках. Выдвинута гипотеза о принадлежности двух выборок одной генеральной совокупности. Проверка поставленной гипотезы проведена с помощью U -критерия Манна — Уитни, в результате которой значение критерия составило $U = \pm 0,67$, что на уровне значимости $p = 0,05$ не превышает критического значения 1,96. Таким образом, можно утверждать, что обе выборки принадлежат одной генеральной совокупности, а следовательно, полученное скорректированное уравнение движения поезда может быть применимо. Графически сравнение результатов моделирования со статистическими данными представлено на рис. 4–6.

Выводы

Как итог, полученное модифицированное уравнение движения возможно использовать при моделировании движения потоков

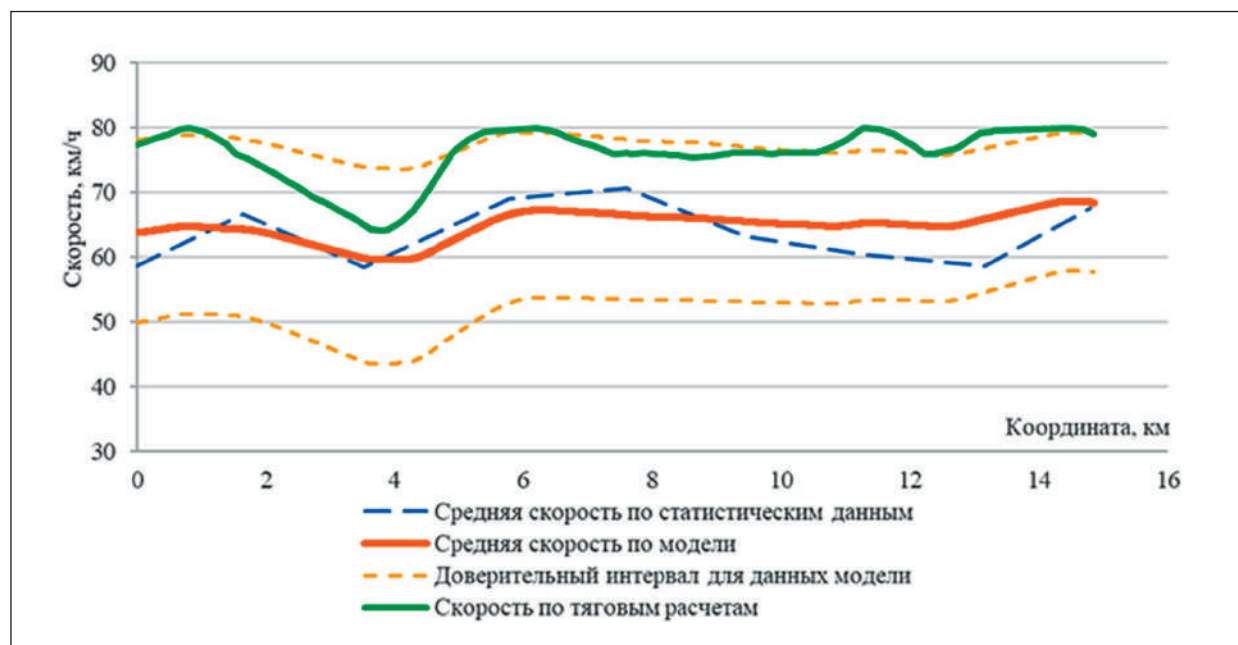


Рис. 4. Сравнение динамики движения поезда при следовании по перегону в грузежном направлении

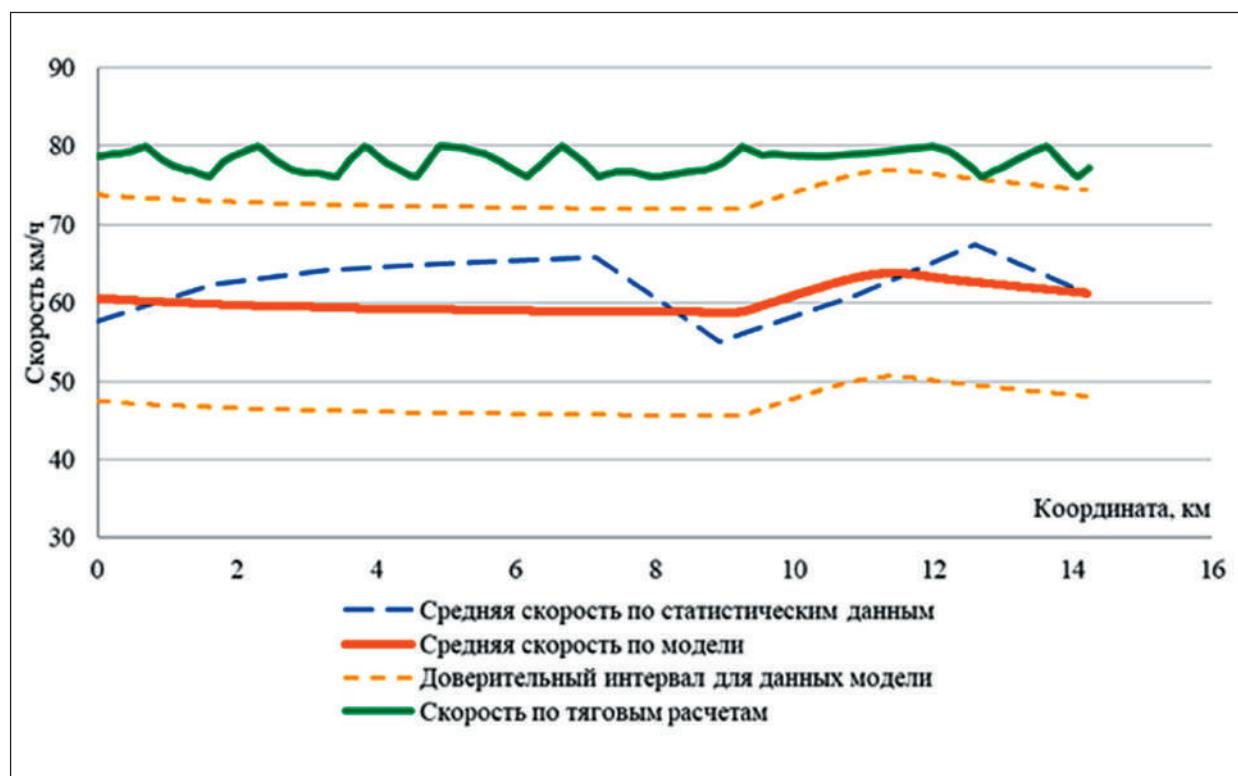


Рис. 5. Сравнение динамики движения поезда при следовании по перегону в порожнем направлении

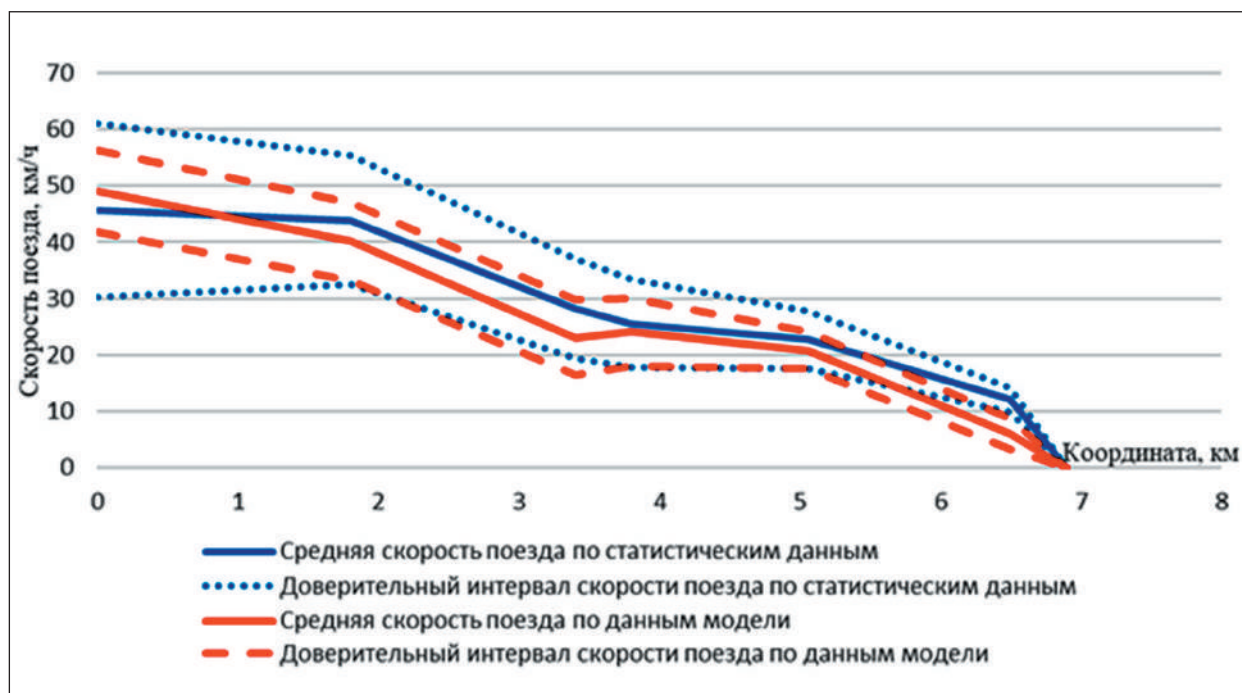


Рис. 6. Сравнение динамики движения поезда при прибытии на станцию

поездов с различными динамическими характеристиками, при различных системах СЦБ, на стыках перегонов и станций. Также будет возможным отслеживание местоположения головы и хвоста поезда, что предоставит данные о времени переключения сигналов локомотивного и путевых светофоров, занятия и освобождения изолированных стрелочных секций [12]. Данное решение позволит рассматривать движение нескольких поездов с различными динамическими характеристиками при их следовании в пакете, взаимовлияние друг на друга, а также определять фактические значения станционных и межпоездных интервалов.

Список источников

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы: распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р.
2. Литвинова А.В., Могила В.П. Меры повышения ходовой скорости движения грузовых поездов на железнодорожном полигоне Ружино — Владивосток // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2013. Т. 2. С. 71–76.
3. Мельк В.О., Вильгельм А.С., Бондаревский Д. И. Повышение точности тяговых расчетов с применением программы «Комплекс расчетов тягового электроснабжения (КОРТЭС)» // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 3 ч. (Омск, 10–11 декабря 2015 года) / отв. ред. И. И. Галиев. Ч. 3. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 180–190.
4. Моделирование работы участка Восточного полигона с использованием программы МСУ в условиях нарушения «нормального» режима ведения поездов / Ж. Янев [и др.] // Наука и техника транспорта. 2024. № 2. С. 13–18.
5. Оптимизация эксплуатационной работы в условиях внедрения современных систем интервального регулирования движения поездов / И. Г. Ковалевский [и др.] // Научные исследования и инновации: сборник статей XI Международной научно-практической конференции (Саратов, 2 сентября 2021 года). Саратов: ИП Емельянов Н.В., 2021. С. 57–64.
6. Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования: приказ Минтранса РФ от 18.07.2018 № 266.
7. Левин Д.Ю., Павлов В.Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. 364 с.
8. Язев Д.В., Костенко В.В. Исследование движения потока грузовых поездов на подходах к станциям стыкования родов тока // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. (Санкт-Петербург, 14–21 апреля 2025 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2025. С. 154–159.
9. Костенко В.В., Язев Д.В. Моделирование процессов приема грузового поездопотока на техническую станцию при различных исходных параметрах // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах: сборник трудов: в 2 ч. (Санкт-Петербург, 11–13 октября 2023 года). СПб.: ПГУПС, 2023. С. 247–252.
10. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д транспорта. М.: УМК МПС России, 2000. 592 с.
11. Абляимов О.С. Уравнение движения поезда и некоторые методы его решения // Universum: технические науки. 2020. № 9 (78). С. 72–75.

12. Язев Д. В., Костенко В. В. Математическая модель посекционного занятия горловины железнодорожной станции с учетом динамики прибывающего поезда // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 15–22 апреля 2024 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 361–366.

Дата поступления: 18.04.2026

Решение о публикации: 15.05.206

Контактная информация:

ЯЗЕВ Денис Викторович — аспирант;

denchik_yazik167@mail.ru

КОСТЕНКО Владимир Васильевич — кандидат

техн. наук, доцент; docentkostenko@yandex.ru

ИВАНКОВ Алексей Николаевич – кандидат техн.

наук, доцент; aivankov@yandex.ru

Simulation of Train Movement Based on Statistical Data Processing

D. V. Yazev¹, V. V. Kostenko¹, A. N. Ivankov²

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

² “PSK TechProekt” LTD, bldg. 1, 21 Krasnoselsky 3rd aley., Moscow, 107140, Russia

For citation: *Yazev D. V., Kostenko V. V., Ivankov A. N.* Simulation of Train Movement Based on Statistical Data Processing // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 370–380. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-370-380 (In Russian)

Abstract

The article discusses the features of modeling of train movement with clarification of the results of traction calculations. **Purpose:** modification of the train movement equation taking into account random factors based on processed statistical data for use in dynamic models. **Methods:** mathematical modeling, probability theory, Euler, Runge — Kutta methods. Statistical hypotheses are tested about the belonging of real trip registration data and data obtained by modeling to one general population. **Results:** during the analysis of statistical data obtained from recording cassettes and high-speed tapes, it is proposed to clarify the existing equation of motion with correction coefficients obtained empirically. A hypothesis is put forward that statistical and calculated data belong to one total population. **Practical significance:** as a result of confirming the hypothesis, the modified equation of motion can be used when modeling the movement of the flow of trains with various dynamic characteristics, including when arriving and departing at stations, as well as determine the actual values of station and inter-train intervals.

Keywords: equation of train movement, traction calculations, dynamics of train movement, mathematical modeling, arrival at the station

References

1. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty: rasporyazhenie OAO “RZHD” ot 12.05.2016 № 867r. [Rules of Traction Calculations for Train Operation:

Russian Railways Order, no. 867r, dated December 05, 2016]. (In Russian)

2. Litvinova A. V., Mogila V. P. Mery povysheniya khodovoi skorosti dvizheniya gruzovykh poezdov na

zheleznodorozhnom poligone Ruzhino — Vladivostok [Measures to Increase the Running Speed of Freight Trains at the Ruzhino-Vladivostok Railway Range], *Nauchno-tekhnicheskoe i ehkonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, Technical and Economic Cooperation of the Asia-Pacific Countries in the 21st Century], 2013, vol. 2, pp. 71–76. (In Russian)

3. Mel'k V.O., Vil'gel'm A.S., Bondarevskii D.I. Povyshenie tochnosti tyagovykh raschetov s primeneniem programmy “Kompleks raschetov tyagovogo ehlektrosnabzheniya (KORTEHS)” [Improving the Accuracy of Traction Calculations Using the Program “Complex Calculations of Traction Power Supply (KORTPP)”], *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Technological Support for the Repair And Improvement of the Dynamic Qualities of Railway Rolling Stock], *Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation in Three Parts*, Omsk, December 10–11, 2015. Part 3. Omsk: Omsk State Transport University, 2015, pp. 180–190. (In Russian)

4. Yanev Zh., et al. Modelirovanie raboty uchastka Vostochnogo poligona s ispol'zovaniem programmy MSU v usloviyakh narusheniya “normal'nogo” rezhima vedeniya poezdov [Simulation of the Operation of the Eastern Landfill Site Using the MSU Program in Conditions of Violation of the “Normal” Train Operating Mode], *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport], 2024, no. 2, pp. 13–18. (In Russian)

5. Kovalevskij I.G., et al. Optimizatsiya ehkspluatatsionnoi raboty v usloviyakh vnedreniya sovremennykh sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Optimization of Operational Work in the Context of the Introduction of Modern Interval Train Control Systems], *Nauchnye issledovaniya i innovatsii* : Sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Saratov, 2 sentyabrya 2021 goda [Scientific Research and Innovation:

Collection of Articles of the XI International Scientific and Practical Conference, Saratov, September 02, 2021], Saratov, 2021, pp. 57–64. (In Russian)

6. Ob utverzhdenii Metodiki opredeleniya propusknoi i provoznoi sposobnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya: prikaz Mintransa RF ot 18 iyulya 2018 goda №266 [On Approval of the Methodology for Determining the Throughput and Carrying Capacity of the Public Railway Transport Infrastructure: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated July 18, 2018, no. 266]. (In Russian)

7. Levin D. Yu., Pavlov V. L. Raschet i ispol'zovanie propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog: monografiya [Calculation and Use of Railway Capacity: A Monograph], *Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte* [Educational and Methodological Center for Railway Transport Education], Moscow, 2011, 364 p. (In Russian)

8. Yazev D. V., Kostenko V. V. Issledovanie dvizheniya potoka gruzovykh poezdov [Investigation of the Flow of Freight Trains on the Approaches to the Stations of the Junction of Electric Currents], *Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the LXXXV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*, Saint Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2025, pp. 154–159. (In Russian)

9. Kostenko V.V., Yazev D.V. Modelirovanie protsessov priema gruzovogo poezdopotoka na tekhnicheskuyu stantsiyu pri razlichnykh iskhodnykh parametrah [Modeling of the Processes of Receiving Freight Train Traffic to a Technical Station with Different Initial Parameters], *Development of Infrastructure and Logistics Technologies in Transport Systems: Proceedings in Two Parts*, Saint Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2023, pp. 247–252. (In Russian)

10. Osipov S. I., Osipov S. S. Osnovy tyagi poezdov. Uchebnik dlya studentov tekhnikumov i kolledzhei zh/d tr-ta [Fundamentals of Train Traction: A Textbook for

Students of Technical Schools and Colleges of Railway Transport], Moscow, Educational and Methodical Office of the Ministry of Railways of Russia, 2000, 592 p. (In Russian)

11. Ablyalimov O. S. Uravnenie dvizheniya poezda i nekotorye metody ego resheniya [The Equation of Train Motion and Some Methods of Its Solution], *Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Technical sciences]*, 2020, no. 9 (78), pp. 72–75. (In Russian)

12. Yazev D. V., Kostenko V. V. Matematicheskaya model' posektsionnogo zanyatiya gorloviny zheleznodorozhnoi stantsii s uchetom dinamiki pribyvayushchego poezda [Mathematical Model of Sectional Occupation of the Neck of a Railway Station, Taking into Account the Dynamics of an Incoming Train], *Transport: Problems, Ideas, Prospects:*

Proceedings of the LXXXIV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Saint Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2024, pp. 361–366. (In Russian)

Received: April 18, 2026

Accepted: May 15, 2026

Author's information:

Denis V. YAZEV – Postgraduate Student;
denchik_yazik167@mail.ru

Vladimir V. KOSTENKO – PhD in Engineering,
Associate Professor; docentkostenko@yandex.ru

Aleksey N. IVANKOV – PhD in Engineering,
Associate Professor; aivankov@yandex.ru

УДК 656.073.26

Разработка методики переработки контейнеропотоков на основе языка транспортно-логистических объектов

Е. А. Кайкина, А. В. Новичихин

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

Для цитирования: Кайкина Е. А., Новичихин А. В. Разработка методики переработки контейнеропотоков на основе языка транспортно-логистических объектов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 2. С. 381–390. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-381-390

Аннотация

Цель: повышение эффективности функционирования транспортно-логистического центра на основе разработки методики формирования оптимального плана переработки контейнеропотоков. **Методы:** системный анализ транспортно-логистических операций, математическое моделирование вариантов переработки контейнеропотоков, метод многокритериальной оптимизации по выбранным критериям. **Результаты:** разработаны методические основы языка транспортно-логистических объектов, построена структурная модель транспортно-логистического центра, предложена математическая постановка задачи оптимизации переработки контейнеропотока в условиях транспортно-логистического центра, усовершенствован алгоритм переработки контейнеропотоков, выполнено моделирование вариантов переработки и определен оптимальный. **Практическая значимость:** внедрение предложенной методики в процесс планирования переработки контейнеропотоков позволит повысить перерабатывающую способность транспортно-логистического центра.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, транспортно-логистический центр, язык транспортно-логистических объектов, алгоритм, контейнеропоток

Введение

В условиях растущего контейнеропотока ключевым недостатком функционирования современных транспортно-логистических центров (далее — ТЛЦ) является ограниченная перерабатывающая способность инфраструктуры [1]. В связи с этим увеличивается время выполнения операций с грузами, растут эксплуатационные затраты, а также повышается риск возникновения задержек в процессе переработки контейнеропотоков [2]. Возникает необходимость совершенствования методов управления функционированием ТЛЦ для обеспечения устойчивости технологического процесса переработки контейнеропотоков в условиях взаимодействия различных видов транспорта.

Вопросу повышения эффективности функционирования транспортно-логистической системы, организации мультимодальных перевозок, а также совершенствования терминально-складского комплекса посвящены труды отечественных и зарубежных научных исследователей.

В работе О. Б. Маликова рассмотрены особенности функционирования транспортно-логистических систем и терминально-складской инфраструктуры [3], особенности взаимодействия железнодорожного транспорта при мультимодальных перевозках представлены в работах А.С. Балалева и Р.Г. Леонтьева [4]. В исследованиях С.Ю. Елисеева рассматриваются вопросы

построения и оптимизации международных транспортно-логистических систем на основе системного анализа [5]. Е.К. Коровяковским рассмотрены проблемы развития транспортно-логистических центров на железнодорожном транспорте [6]. В исследованиях зарубежных авторов Н.-О. Günther и К.Н. Kim освещены вопросы управления транспортно-логистическими операциями при применении количественных методов организации работы контейнерных терминалов [7]. В более современных работах авторов В.А. Weerasinghe, Н.Н. Perera, Х.Ваі рассмотрено исследование транспортно-логистических операций и многокритериальной оптимизации процессов функционирования контейнерных терминалов [8]. В исследованиях Н. Yu проведен анализ подходов к управлению операциями в условиях автоматизации контейнерных терминалов [9].

Однако существующие методы в недостаточной степени учитывают интегрирование логистических объектов, взаимодействие и взаимосвязи их технологических процессов на ТЛЦ при построении вариантов переработки контейнеропотоков.

Таким образом, задачей исследования является разработка методики переработки контейнеропотоков на основе языка транспортно-логистических объектов и определение критериев для оптимизации планирования работы ТЛЦ.

Ранее авторами был проведен анализ транспортно-логистического комплекса страны, выявлены основные направления повышения эффективности работы ТЛЦ [10], на основе которых была сформулирована концепция совершенствования функционирования ТЛЦ [11], и предложено совершенствование укрупненной схемы системы управления региональным транспортно-логистическим комплексом (далее — ТЛК) [11].

Математическая постановка задачи оптимизации переработки контейнеропотоков на ТЛЦ

В условиях функционирования ТЛЦ скорость и показатели эффективности переработки контейнеропотока зависят от параметров работы, изменяющихся в процессе выполнения операций. Сформулируем математическую постановку задачи оптимизации технологического процесса для выявления оптимального варианта переработки грузов, прибывающих на ТЛЦ.

Пусть дано $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество контейнеропотоков, перерабатываемых на ТЛЦ, каждый из которых характеризуется объемом контейнеропотока в Q_x ДФЭ. Оптимизирование технологического процесса переработки контейнеропотоков на ТЛЦ предлагается на основе следующих критериев:

1. Время нахождения ($T_{x,i,j}$) контейнеропотока на ТЛЦ при выполнении операции i , на пункте j ТЛЦ при выбранном варианте переработки V :

$$T(V) = \sum_x^X \sum_i^D \sum_j^E T_{x,i,j} \longrightarrow \min,$$

$$i \in D; j \in E; x \in X,$$

где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_o\}$ — множество вариантов переработки контейнеропотока на ТЛЦ;

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ — множество технологических операций, выполняемых в процессе переработки контейнеропотока на ТЛЦ;

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ — множество объектов инфраструктуры ТЛЦ, в условиях которых выполняется операция.

2. Затраты ($C_{x,i,j}$) на переработку контейнеропотока при выполнении операции i , на пункте ТЛЦ — j при варианте V :

$$C(V) = \sum_x^X \sum_i^D \sum_j^E C_{x,i,j} \longrightarrow \min.$$

3. Производительность ТЛЦ $P(V)$ при переработке контейнеропотока X объемом Q_x

в процессе выполнения операции i , на пункте ТЛЦ — j за время T :

$$P(V) = \frac{\sum_x Q_x}{\sum_x \sum_i \sum_j T_{x,i,j}} \rightarrow \max.$$

4. Риск возникновения задержки $R(V)$

в процессе переработки контейнеропотоков на ТЛЦ (по т. Байеса [12]).

Данный параметр необходим для учета неравномерности поступления контейнеропотоков, ограниченности инфраструктуры и возможных отказов погрузо-разгрузочных механизмов (далее ПРМ):

$$R(V) = P(V | U_w) = \frac{P(V) \cdot \prod_{w=1} P(V | U_w)}{P(U_w)} \rightarrow \min,$$

где V — выбранный вариант переработки контейнеропотока;

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_w\}$ — множество факторов, влияющих на процесс переработки контейнеропотока;

$P(V)$ — априорная вероятность варианта V ;

$P(V | U_w)$ — условная вероятность фактора U_w при варианте V ;

$\prod_{w=1} P(V | U_w)$ — произведение вероятностей всех факторов при данном варианте;

$P(U_w)$ — вероятность наблюдения данного набора факторов.

Тогда задача оптимизации переработки контейнеропотока на ТЛЦ может быть представлена в виде многокритериальной функции:

$$F(V) = \{\min T(V); \min C(V); \min P(V); \min R(V)\}.$$

Требуется сформировать варианты работы ТЛЦ с контейнеропотоками при учете существующих ограничений:

1. Ограничение перерабатывающей способности ТЛЦ:

$$Q(V) \leq Q^{\max},$$

где $Q(V)$ — объем перерабатываемого контейнеропотока по варианту V ;

Q^{\max} — максимальная перерабатывающая способность ТЛЦ.

2. Количество ПРМ:

$$N(V) \leq N^{\text{общ}},$$

где $N(V)$ — количество задействованных ПРМ при переработке контейнеропотока по варианту V ;

$N^{\text{общ}}$ — общее количество ПРМ на ТЛЦ.

3. Ограничение вместимости контейнерной площадки:

$$S(V) \leq S^{\max},$$

где $S(V)$ — площадь контейнерной площадки, используемая при переработке контейнеропотока по варианту V ;

S^{\max} — максимальная вместимость контейнерной площадки.

Таким образом, сформулированная математическая задача оптимизации переработки контейнеропотока на ТЛЦ заключается в формировании вариантов технологических операций с контейнерами и выбора среди них наиболее эффективного по заданным критериям.

Методические основы языка транспортно-логистических объектов

Для решения поставленной задачи необходимо структурированное описание объектов инфраструктуры ТЛЦ и выполняемых технологических операций с контейнеропотоками между ними. В связи с этим предлагается использование разработанной авторами методики языка транспортно-логистических объектов.

Данная методика позволяет представить функционирование ТЛЦ как структурную схему, состоящую из взаимосвязанных объектов и операций, необходимую для моделирования

вариантов переработки контейнеропотока и выбора оптимального из них.

Первым этапом формулирования методики является выделение основных зон ТЛЦ, участвующих в процессе переработке контейнеропотоков:

- зоны приема и отправления контейнеропотоков;
- зоны выполнения складских операций и временного хранения грузов;
- зоны выполнения погрузо-выгрузочных операций.

Выделенные зоны выбраны в соответствии с выполняемыми технологическими операциями и содержат объекты переработки контейнеропотоков, перевозимых автомобильным и железнодорожным транспортом.

Так, зона приема и отправления контейнеропотоков состоит из **PP** — пути приемо-отправочного парка, **KPP** — контрольно-пропускного пункта автотранспорта, **AS** — автомобильной стоянки.

Зона выполнения погрузо-выгрузочных операций состоит из **PG** — пути погрузки-выгрузки, **AF** — фронта выгрузки автотранспорта.

Зона выполнения складских операций и временного хранения грузов состоит из **SB** — зоны буферного хранения, **KP** — контейнерной площадки.

Для описания последовательности технологических операций и взаимосвязей между представленными транспортно-логистическими объектами авторами построена модель функционирования ТЛЦ «Сухой порт О» в интерпретации диаграммы IDEF0 (рис. 1). Построенная схема позволяет наглядно отследить маршруты перемещения контейнеропотоков на ТЛЦ и построить варианты их переработки.

Схема включает все приведенные выше зоны и объекты, а также технологические свя-

зи между ними, обозначающие контейнеропотоки в различных состояниях:

X^c , X^1 — контейнеропоток, состоящий из порожних и груженых контейнеров;

X_{AT} , X_{RT} — контейнеропоток, перевозимый автомобильным и железнодорожным транспортом;

$X_{ПРМ}$ — внутренние контейнеропотоки, перемещаемые при помощи ПРМ на территории ТЛЦ;

$X_{ТР}$ — транзитный контейнеропоток.

На схеме также отображены векторы планируемых показателей выполнения операций в условиях логистического объекта (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5) и векторы фактически полученных данных (B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , B_5).

На основе предложенной схемы сформирован алгоритм формирования оптимального плана переработки контейнеропотока на ТЛЦ (рис. 2). Алгоритм состоит из трех этапов.

На первом этапе происходит моделирование процесса переработки контейнеропотока с учетом входных данных и формирование вариантов переработки контейнеропотока при использовании языка транспортно-логистических объектов.

Второй этап — оперативное управление, в процессе которого происходит анализ текущего состояния ТЛЦ и корректировка полученного на первом этапе плана при учете ограничений перерабатывающей способности ТЛЦ.

Третьим этапом является сбор и обработки данных о выполненных операциях на ТЛЦ для учета и использования полученного опыта при планировании.

В результате формируются варианты переработки контейнеропотока, которые отличаются последовательностью технологических операций, распределением контейнеров между объектами инфраструктуры ТЛЦ.

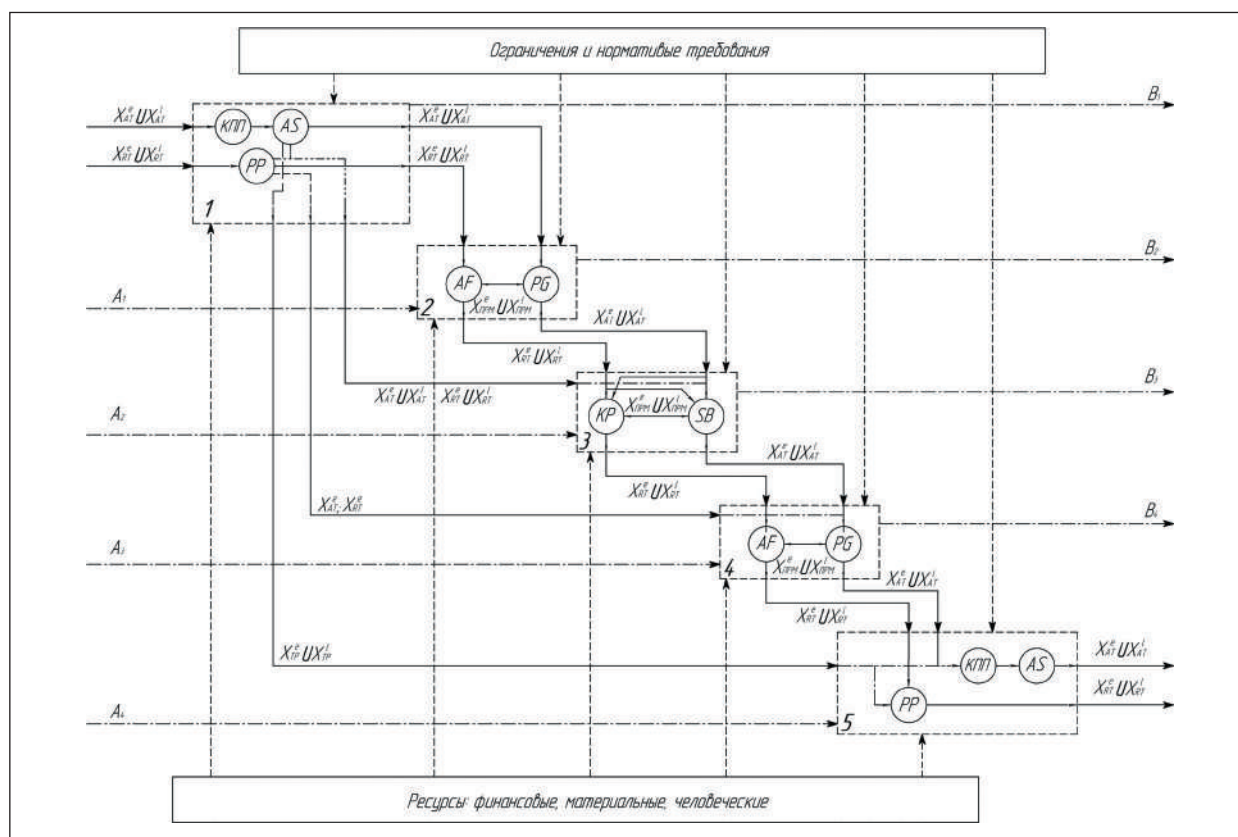


Рис. 1. Схема переработки контейнеропотока на ТЛЦ в интерпретации IDEF0 с применением языка транспортно-логистических объектов

Моделирование вариантов переработки контейнеропотока

Для обоснования практического применения предлагаемой методики на примере ТЛЦ «Сухой порт О» с параметрами, указанными в табл. 1, было выполнено моделирование вариантов переработки контейнеропотоков (табл. 2) при условии, что в среднем в сутки на ТЛЦ прибывает 5 контейнерных поездов, состоящих из 71 условного вагона с 40-футовыми контейнерами под выгрузку на контейнерную площадку и последующую погрузку на автомобильный транспорт.

Для каждого предлагаемого варианта выполнен расчет критериев оптимизации при переработке контейнеропотока на ТЛЦ, включающих время переработки, эксплуатационные затраты,

производительность и риск возникновения задержек. Полученные результаты позволяют провести анализ влияния параметров транспортно-логистических объектов на эффективность переработки контейнеропотоков и выявить различия между сформированными вариантами организации работы ТЛЦ (табл. 3).

Таким образом, для каждого варианта выполнена комплексная оценка их эффективности по выбранным критериям оптимизации, а также попарное сравнение представленных вариантов. В результате получено, что вариант №6 обеспечивает оптимальное использование ресурсов ТЛЦ за счет сокращения времени переработки контейнеропотоков при высокой производительности и низкой вероятности возникновения задержек.

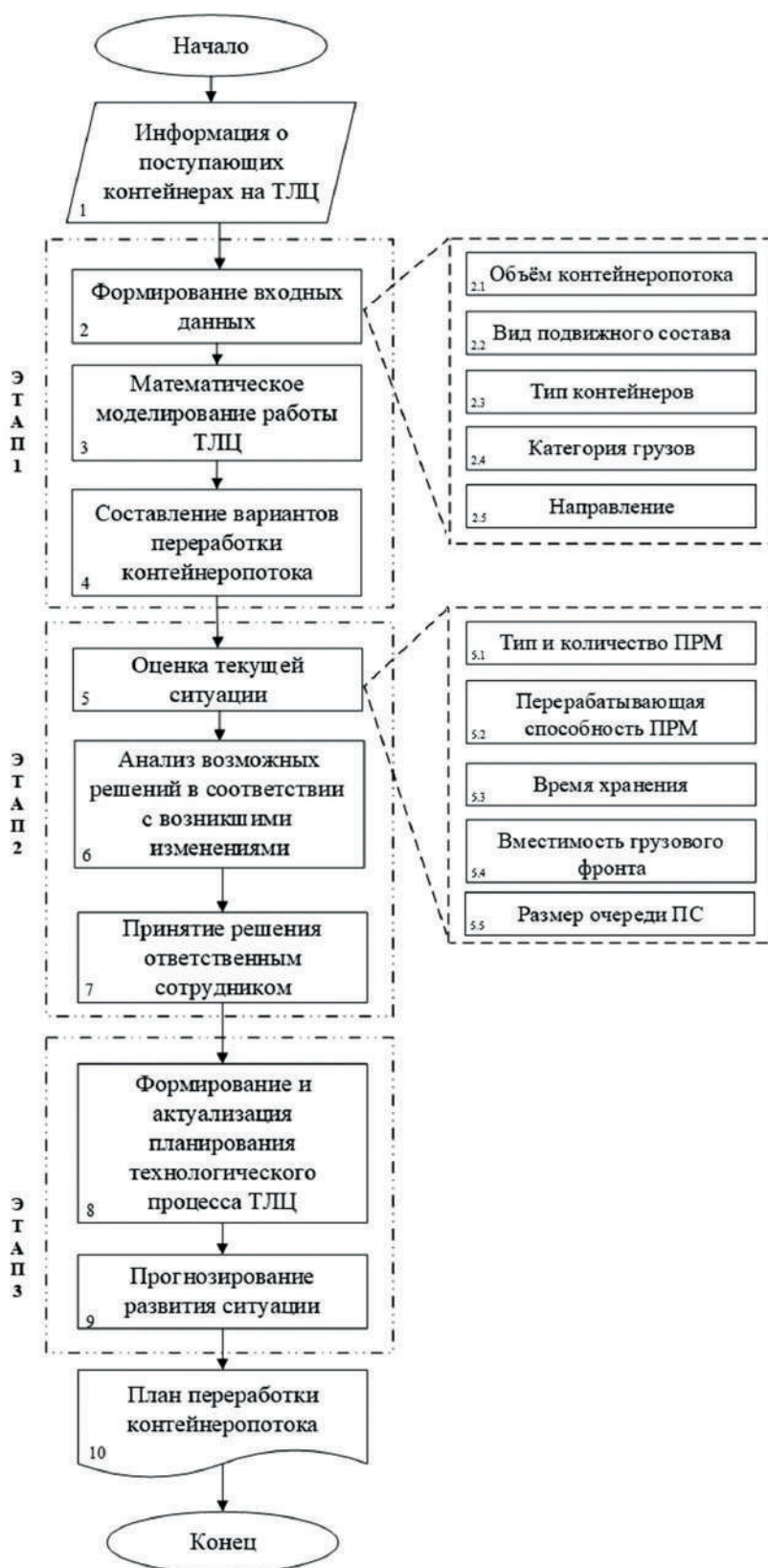


Рис. 2. Алгоритм формирования оптимального плана переработки контейнеропотока на ТЛЦ

ТАБЛИЦА 1. Параметры ТЛЦ «Сухой порт О»

Параметр	Усл. обозн.	Данные
Козловые краны	шт.	6
Ричстакеры	шт.	8
Автопогрузчики	шт.	4
Ворот автофронта	шт.	6
Площадь ТЛЦ	тыс. м ²	60
Персонал	чел.	120
Площадь контейнерной площадки	тыс. м ²	36
Ярусность	конт.	4
Время хранения	сут.	4
Вместимость приемо-отправочных путей	усл. в.	71
Кол-во приемо-отправочных путей	шт.	2
Вместимость погрузо-выгрузочных путей	усл. в.	71
Кол-во погрузо-выгрузочных путей	шт.	4
Размер стоянки автомобилей	тыс. м ²	9
Смена	ч	8

ТАБЛИЦА 2. Варианты переработки контейнеропотоков

Вариант	Особенность
1	Выгрузка козловыми кранами с последующим хранением и погрузкой
2	Комбинированная схема: 4 крана под выгрузку и 6 ричстакеров под складские операции и погрузку
3	Комбинированная схема: 4 крана и 2 ричстакера под выгрузку (с использованием буферной зоны и контейнерной площадки), 4 ричстакера под погрузку
4	По прямому варианту: 4 крана, 6 ричстакеров, 2 автопогрузчика (с применением буферной зоны)
5	Выполнение выгрузки 4 кранами в ночное время, погрузки 5 ричстакерами в дневное время с применением 2 автопогрузчиков
6	Комбинированная схема с выделением зон работы ричстакеров: 4 крана под выгрузку (с использованием буферной зоны и контейнерной площадки), 6 ричстакеров под погрузку с применением 2 автопогрузчиков
7	Комбинированная схема с сокращением длин маршрутов ричстакеров: 4 крана под выгрузку (с использованием буферной зоны и контейнерной площадки), 6 ричстакеров под погрузку с применением 2 автопогрузчиков
8	Комбинированная схема с применением резервов ПРМ: 3 крана на выгрузку (1 в оперативном резерве), 4 ричстакера под погрузку (2 в оперативном резерве)

ТАБЛИЦА 3. Результаты моделирования

Вариант переработки	<i>T</i> (сут.)	<i>C</i> (тыс. руб.)	<i>P</i> (конт. смена)	<i>R</i>
1	4	270	680	0,72
2	3,2	320	1292	0,34
3	2,5	420	1550	0,41

Окончание табл. 3

Вариант переработки	T (сут.)	C (тыс. руб.)	P (конт. смена)	R
4	1,2	350	1421	0,47
5	3,6	300	782	0,49
6	2,8	340	1448	0,28
7	3,4	290	802	0,44
8	3,0	330	850	0,31

Заключение

В результате проведенного исследования сформулирована математическая задача оптимизации переработки контейнеропотоков на ТЛЦ в условиях ограничения перерабатывающей способности инфраструктуры. Выявлены ключевые критерии оптимальности, а также ограничения.

Для решения поставленной задачи разработана методика языка транспортно-логистических объектов, предназначенная для структурного описания объектов ТЛЦ, технологических операций и маршрутов перемещения контейнеропотоков между ними, а также позволяющая моделировать варианты технологических операций при переработке контейнеропотоков.

На основе предложенного языка объектов составлены схема взаимодействия инфраструктуры ТЛЦ и алгоритм, включающий в себя этапы формирования оптимального плана работы ТЛЦ.

Как пример применения методики было выполнено моделирование вариантов переработки контейнеропотоков на примере ТЛЦ «Сухой порт О». Для оценки эффективности построенных вариантов использовано комплексирование критериев оптимальности, включающее время переработки контейнеропотоков, эксплуатационные затраты, производительность и риск возникновения задержек.

Результаты выполненных расчетов доказали возможность применения предложенной

методики для выбора оптимального варианта переработки контейнеропотоков.

Таким образом, практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной методики языка транспортно-логистических объектов при моделировании и оптимизации процесса функционирования ТЛЦ в условиях увеличения контейнеропотоков.

Список источников

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 № 3363-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (дата обращения: 25.04.2026).
2. Концепция создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации. М.: ОАО «РЖД», 2012. 79 с.
3. Маликов О.Б. Складская и транспортная логистика в цепях поставок: учебное пособие. СПб.: Питер, 2015. 400 с.
4. Балалаев А.С., Леонтьев Р.Г. Транспортно-логистическое взаимодействие при мультимодальных перевозках. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. 268 с.
5. Елисеев С.Ю. Построение и оптимизация функционирования международных транспортно-логистических систем. М.: ВИНТИ РАН, 2006. 242 с.: ил.
6. Коровяковский Е. К. Проблемы развития системы логистических центров на железнодорожном

транспорте // Логистические системы в глобальной экономике. 2013. № 3-1. С. 121–125.

7. Günther H.-O., Kim K. H. Container Terminals and Automated Transport Systems: Logistics Control Issues and Quantitative Decision Support. Berlin: Springer, 2005. 374 p.

8. Weerasinghe B. A., Perera H. N., Bai X. Optimizing Container Terminal Operations: A Systematic Review of Operations Research Applications // Maritime Economics & Logistics. 2023. Vol. 26, no. 2. Pp. 1–35.

9. Yard Operations and Management in Automated Container Terminals: A Review / H. Yu [et al.] // Sustainability. 2022. Vol. 14, no. 6. P. 3419.

10. Кайкина Е. А., Новичихин А. В. Направления совершенствования функционирования транспортно-логистического комплекса // Труды XXV Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов (Санкт-Петербург,

21–23 апреля 2025 г.) / под ред. проф. И. Б. Арефьева. СПб.: Медиапапир, 2025. С. 158–163.

11. Кайкина Е. А., Новичихин А. В. Совершенствование функционирования транспортно-логистического центра: концепция и система управления // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. Вып. 3. С. 37–46.

12. Бишоп К. Распознавание образов и машинное обучение. М.: Вильямс, 2016. 738 с.

Дата поступления: 13.04.2026

Решение о публикации: 15.05.2026

Контактная информация

КАЙКИНА Екатерина Александровна — аспирант; kaikina_lkr@mail.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — доктор техн. наук, доцент; novitchihin@bk.ru

Development of Methods for Processing Container Flows Based on the Language of Transport and Logistics Facilities

E. A. Kajkina, A. V. Novichikhin

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

For citation: *Kajkina E. A., Novichikhin A. V. Development of Methods for Processing Container Flows Based on the Language of Transport and Logistics Facilities // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 381–390. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-381-390 (In Russian)*

Abstract

Objective: increase the efficiency of the transport and logistics center based on the development of a methodology for forming an optimal plan for processing container flows. **Methods:** system analysis of transport and logistics operations, mathematical modeling of container traffic processing options, a multi-criteria optimization method based on selected criteria. **Results:** methodological foundations of the language of transport and logistics facilities have been developed, a structural model of a transport and logistics center has been constructed, a mathematical formulation of the problem of optimizing container traffic processing in the conditions of a transport and logistics center has been proposed, an algorithm for processing container traffic has been improved, processing options have been modeled and the optimal one has been determined. **Practical significance:** the implementation of the proposed methodology in the process of container stream processing planning will increase the processing capacity of the transport and logistics center.

Keywords: railway transport, transport and logistics center, language of transport and logistics facilities, algorithm, container traffic, algorithm

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 27 noyabrya 2021 goda №3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoj strategii Rossijskoj Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r “On Approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035”]. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (accessed: April 04, 2026). (In Russian)
2. Kontseptsiya sozdaniya terminal'no-logisticheskikh tsentrov na territorii Rossijskoj Federatsii [The Concept of Creating Terminal and Logistics Centers in the Territory of the Russian Federation], Moscow, JSC “Russian Railways”, 2012, 79 p. (In Russian)
3. Malikov O.B. Sklads kaya i transportnaya logistika v tsepyakh postavok: Uchebnoe posobie. Standart tret'ego pokoleniya [Warehouse and Transport Logistics in Supply Chains: A Textbook. The Third Generation Standard], Saint Petersburg, Piter, 2015, 400 p. (In Russian)
4. Balalaev A.S., Leont'ev R.G. Transportno-logisticheskoe vzaimodejstvie pri mul'timodal'nykh perevozkakh [Transport and Logistics Cooperation in Multimodal Transportation], Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”, 2012, 268 p. (In Russian)
5. Eliseev S.Yu. Postroenie i optimizatsiya funktsionirovaniya mezhdunarodnykh transportno-logisticheskikh system [Building and Optimizing the Functioning of International Transport and Logistics Systems], Moscow, All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 2006, 242 p. (In Russian)
6. Korovyakovskij E.K. Problemy razvitiya sistemy logisticheskikh tsentrov na zheleznodorozhnom transporte [Problems of the Development of Logistics Centers in Railway Transport], *Logistics Systems in the Global Economy*, 2013, no. 3-1, pp. 121–125. (In Russian)
7. Günther H.-O., Kim K.H. Container Terminals and Automated Transport Systems: Logistics Control Issues and Quantitative Decision Support. Berlin: Springer, 2005, 374 p.
8. Weerasinghe B. A., Perera H. N., Bai X. Optimizing Container Terminal Operations: A Systematic Review of Operations Research Applications, *Maritime Economics & Logistics*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 1–35.
9. Yu H., et al. Yard Operations and Management in Automated Container Terminals: A Review, *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 6, 3419.
10. Kajkina E. A., Novichikhin A. V. Napravleniya sovershenstvovaniya funktsionirovaniya transportno-logisticheskogo kompleksa [Directions for Improving the Functioning of the Transport and Logistics Complex], *Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Students and Postgraduates*, Saint Petersburg, April 21–23, 2025, edited by Professor I. B. Aref'eva, pp. 158–163, Saint Petersburg, MediaPapir, 2025. (In Russian)
11. Kajkina E.A., Novichikhin A.V. Sovershenstvovanie funktsionirovaniya transportno-logisticheskogo tsentra: kontseptsiya i sistema upravleniya [Improving the Functioning of the Transport and Logistics Center: Concept and Management System], *Bulletin of Scientific Research Results*, 2025, iss. 3, pp. 37–46. (In Russian)
12. Bishop K. Raspoznavanie obrazov i mashinnoe obuchenie [Pattern Recognition and Machine Learning], Moscow, Williams Publishing, 2016, 738 p. (In Russian)

Received: April 13, 2026

Accepted: May 15, 2026

Author's information:

Ekaterina A. KAJKINA — Postgraduate Student;

kaikina_lkr@mail.ru

Aleksey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novichikhin@pgups.ru



УДК 625.1; 628.2

Влияние формы поперечного сечения бесполостной дрены на эффективность осушения

В. И. Штыков¹, А. Б. Пономарев¹, Ю. Г. Янко²

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

² Агрофизический научно-исследовательский институт, Россия, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарев А. Б., Янко Ю. Г. Влияние формы поперечного сечения бесполостной дрены на эффективность осушения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 391–401. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-391-401

Аннотация

Цель: в связи с наблюдающейся тенденцией снижения континентальности климата в условиях Северо-Запада России в ближайшие 30–50 лет приточность к системам водоотведения на железнодорожном транспорте вырастет в среднем на 10–20%, однако уже в настоящее время в слабоводопроницаемых грунтах в отдельные периоды наблюдается переувлажнение. Как показывают расчеты, эффективность осушения земляного полотна может быть существенно увеличена, если применить бесполостный дренаж. Бесполостным дренажам можно придать разную форму поперечного сечения, и представляет практический интерес ответ на вопрос: а как при прочих равных условиях это отразится на эффективности действия дренажа? **Методы:** на несущую способность грунта земляного полотна оказывает влияние его влажностный режим. Увеличение же глубины положения грунтовых вод в земляном полотне, считая от основания шпал, будет способствовать и увеличению несущей способности земляного полотна. Приведен пример гидравлического расчета бесполостных дренажей разной формы поперечного сечения. **Результаты:** установлено, что из трех разных форм поперечного сечения (трапецидального, составного и треугольного) наибольшей эффективностью водоотведения обладает бесполостная дрена, имеющая трапецидальную форму поперечного сечения. В конце статьи для этой же формы поперечного сечения выполнен геотехнический расчет осадок и напряжений в мягкопластичном суглинке. **Практическая значимость:** получено обоснование наиболее эффективной формы поперечного сечения бесполостного дренажа для осушения земляного полотна из слабоводопроницаемых грунтов.

Ключевые слова: бесполостный дренаж, гидравлический расчет, дренажная система, мелиоративный канал

Введение

Широкое применение бесполостных дренажей в различных отраслях промышленности [1–5] — в промышленном, гражданском, гидротехническом и дорожном строительстве, а также в сельском хозяйстве — обусловлено рядом их преимуществ по сравнению с трубчатым дренажом. Бесполостный дренаж не разрушается под воздействием отрицательных температур, со-

храняет работоспособность при просадках, обладает высокой водозахватной способностью, долговечен. При осушении слабоводопроницаемых грунтов или необходимости заложения в зону сезонного промерзания он всегда предпочтительнее трубчатого.

Бесполостный дренаж в сегодняшнем понимании в железнодорожном транспорте начал применяться в 1934 году [6]. В районах

с суровыми климатическими условиями в настоящее время он применяется в качестве фильтрующих насыпей [7]. Однако на Северо-Западе сейчас наблюдается и в ближайшие 30–50 лет продолжится снижение континентальности климата, что приведет к увеличению приточности к дренажу на 10–20%. В этих условиях конструкции дренажа, применяемые в железнодорожном транспорте в слабоводопроницаемых грунтах с коэффициентами фильтрации не более 0,01 м/сут, не обеспечат своевременного снижения уровней воды в земляном полотне. Как показывают сравнительные расчеты, эффективность осушения может быть существенно увеличена, если непосредственно под балластной призмой расположить бесполостные дрены [8]. При этом одновременно бесполостная дрена будет способствовать увеличению несущей способности земляного полотна [9].

Объекты и методы

В общем случае для призматического поперечного сечения бесполостных дрен уравнение движения воды имеет следующий вид:

$$\frac{dh}{ds} = i \frac{q \cdot s}{K_1 \cdot \omega} - \frac{q^2 \cdot s^2}{K_1^2 \cdot \omega^2}, \quad (1)$$

где q — распределенный приток к дрене;
 s — координата живого сечения;
 ω — площадь живого сечения фильтрационного потока;
 h — глубина воды от нижней точки сечения, м;
 K_1, K_t — коэффициенты фильтрации заполнителя бесполостной дрены соответственно при ламинарном и турбулентном режимах;
 i — продольный уклон дрены.

Уравнение (1) для любого режима течения воды в бесполостной дрине, включая переходный, решено было только для случая прямоугольного поперечного сечения. Однако более привлекательным является профиль, поперечное сечение которого сверху расширяется, что будет способствовать выравниванию напряжений в земляном полотне под балластной призмой.

Перепишем уравнение (1) для случая с двухсторонним впадением в коллектор (рис. 1).

Поперечное сечение дрены примем трапецеидальным. Уравнение (1) для трапецеи-

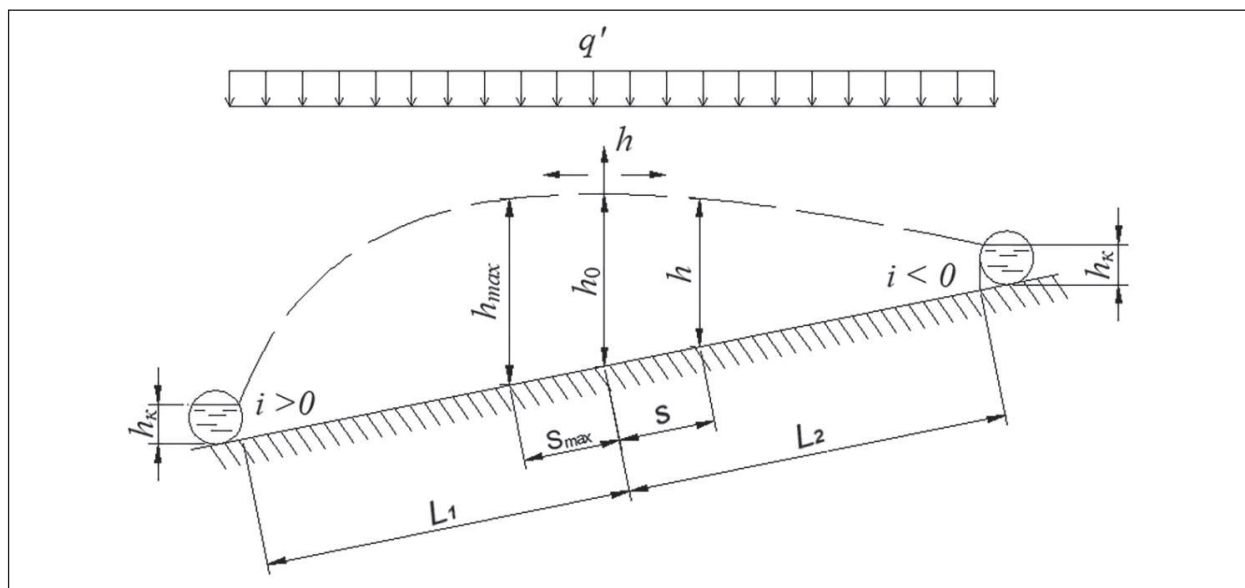


Рис. 1. Расчетная схема бесполостной дрены

дальнего поперечного сечения примет следующий вид:

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{q}{K_l \cdot (b + mh)h} s - \frac{q^2}{K_l^2 \cdot (b + mh)^2 h^2} s^2, \quad (2)$$

где b — ширина бесполостной дрены по дну;
 m — коэффициент откоса.

Уравнение (2) не сводится ни к одному обыкновенному дифференциальному уравнению. Чтобы свести его к решению для прямоугольного сечения, ранее было предложено действительную трапецидальную форму заменить на эквивалентную по площади прямоугольную. Было доказано, что для такого приближенного способа результаты расчета пренебрежимо мало отличаются от точного решения [9].

После замены сечения на прямоугольное уравнение (2) приобретает вид:

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{q}{K_l \cdot b_e \cdot h} s - \frac{q^2}{K_l^2 \cdot b_e^2 \cdot h^2} s^2, \quad (3)$$

где b_e — эквивалентная ширина дрены прямоугольного сечения;

$b_e = b + \beta \cdot m \cdot h_0$, h_0 — искомая глубина в начале координатных осей h и s ;

β — коэффициент, учитывающий изменение глубины фильтрационного потока вдоль бесполостной дрены.

При этом для β было получено следующее выражение:

$$\beta = \frac{2(h_0^2 + h_0 \cdot h_k + h_k^2)}{3 \cdot h_0 (h_0 + h_k)}, \quad (4)$$

где h_k — глубина фильтрационного потока в устье бесполостной дрены.

Для прямоугольной дрены экспериментально было получено, что без подпора глубина в устье h_k равна $0,125h_0$ [5]. Тогда в (4) после подстановки получим $\beta = 0,68$.

Выведем формулу для определения коэффициента β для составного профиля (рис. 2).

Воспользуемся известными точными решениями для случая бесполостной безуклонной дрены составного сечения, которое может быть заменено на прямоугольное, как оговорено выше.

В обоих случаях найдем положение середины между коллекторами, в которые впадают эти дрены по известным зависимостям. Для составного профиля:

$$\frac{L}{2} = \sqrt{\frac{K_n}{3q} (h_0 - a) [3b(h_0 - a) + 2m(h_0 - a)^2]}. \quad (5)$$

Для прямоугольного поперечного сечения эквивалентной ширины:

$$\frac{L}{2} = \sqrt{\frac{K_n (h_0^2 - a^2) \cdot b_e}{q}}. \quad (6)$$

Глубина фильтрационного потока h_0 в обоих случаях одинакова.

Исходя из равенства площадей (рис. 2),

$$b_e h_0 = b \cdot h_0 + m(h_0 - a)^2, \quad (7)$$

получаем:

$$b_e = b + \beta \cdot \frac{m(h_0 - a)^2}{h_0}. \quad (8)$$

Из равенства правых частей уравнений (5) и (6) для b_e получим следующее выражение:

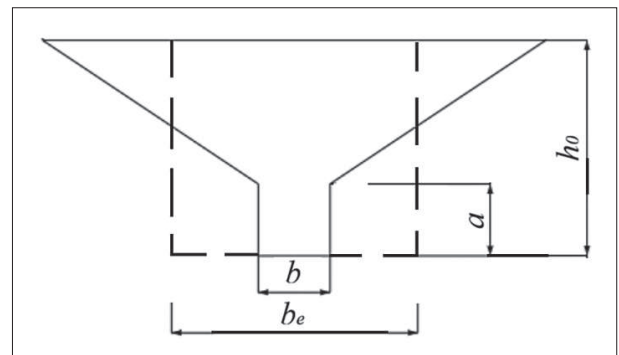


Рис. 2. Составной профиль бесполостной дрены

$$b_e = b + \beta \cdot \frac{2m(h_0 - a)^2}{3(h_0 + a)}, \quad (9)$$

откуда

$$\beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)}. \quad (10)$$

Из зависимости (10) следует, что в случае составного сечения на величину коэффициента β влияет высота прямоугольной части сечения, равная a .

Сопоставим бесполостные дренажи исследованных нами форм поперечного сечения по их способности понижать уровень воды в земляном полотне. Сечение с глубиной h_0 (рис. 1) находится там, где скорость движения воды в заполнителе дренажа равна нулю. От этого сечения вода течет в противоположные стороны, вверх и вниз по уклону. При одинаковой отметке заложения дна дренажей понижение уровня воды тем больше, чем меньше в указанной точке будет величина h_0 (рис. 1). Дренажи заложены с одинаковым уклоном, имеют равные длины кривой депрессии вниз по уклону (L_1) и заполнены одинаковым щебнем. Поперечные сечения дренажей показаны на рис. 3.

Материал заполнителя бесполостной дренажи — щебень фракции 5–20 мм: $d_{17} = 1,2$ см (определяется по кривой гранулометрического

состава); $\eta = 1,9$ — коэффициент неоднородности материала щебня; $\psi = 1,68$ — коэффициент формы частиц; $C_0 = 78$ см^{0,5}/с — коэффициент Шези; $\nu = 0,0131$ см²/с — коэффициент кинематической вязкости воды, принят для температуры 10 °С.

Результаты исследований

Приведем гидравлический расчет по определению глубины воды в бесполостной дренаже составного профиля в точке водораздела (рис. 1), которая обозначена через h_0 . Для двух других случаев в табличной форме представим результаты расчета и сравним полученные значения.

В рассматриваемом случае b_e вычисляется по формуле (8). Ход расчета изложен ниже.

1. Рассчитаем величину расчетного диаметра фильтрационного хода d_u :

$$\begin{aligned} d_u &= 0,57 \sqrt[6]{\eta} \cdot \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi} = \\ &= 0,57 \cdot \sqrt[6]{1,9} \cdot \frac{0,48}{1-0,48} \cdot \frac{1,2}{1,68} = 0,42 \text{ см,} \end{aligned}$$

где n — пористость щебня.

2. Вычисляем коэффициенты фильтрации при ламинарном и турбулентном режимах.

При ламинарном режиме:

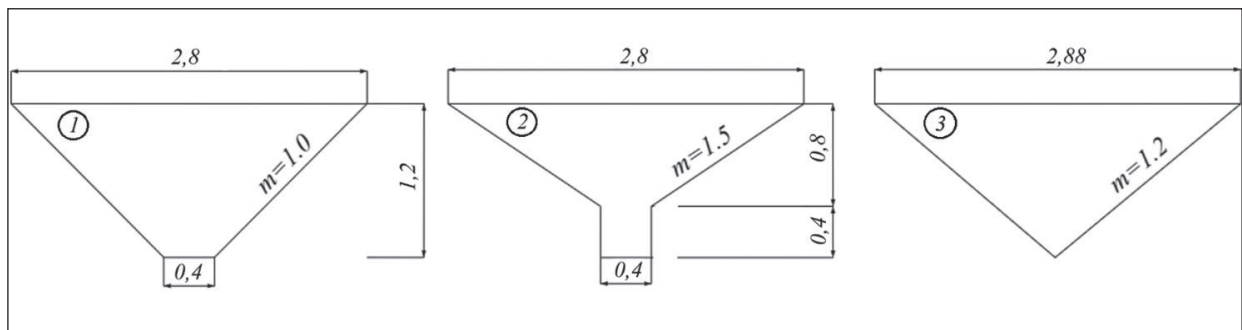


Рис. 3. Формы поперечных сечений бесполостной дренажи: 1 — трапециевидное; 2 — составное; 3 — треугольное

$$K_l = \frac{n \cdot g \cdot d_u^2}{8\pi^2 \cdot \nu} = \frac{0,48 \cdot 9,81 \cdot 0,0042^2}{8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} = 0,803 \text{ м/с,}$$

при турбулентном режиме:

$$K_t = \frac{n \cdot C_0}{\pi^{3/2}} \sqrt{2d_u} = \frac{0,48 \cdot 78}{3,14^{3/2}} \sqrt{2 \cdot 0,42} = 6,17 \text{ см/с}$$

или 0,0617 м/с.

3. Для определения h_0 имеем следующую расчетную зависимость [10]:

$$h_0 = L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-\Phi_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}}.$$

Значение h_0 находится методом подбора, поскольку ряд величин, входящих в формулу (11), зависят от этого значения. Примем $h_0 = 0,85$ м. Длина L_1 составит по проекту дренажа 60 м.

Последовательность расчета:

$$t_k = \frac{h_k}{L_1} = \frac{0,125h_0}{L_1} = \frac{0,125 \cdot 0,85}{60} = 1,77 \cdot 10^{-3}, \quad \beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)} = \frac{2 \cdot 0,85}{3(0,83 + 0,4)} = 0,45,$$

$$b_e = b + \frac{m \cdot \beta (h_0 - a)^2}{h_0} = 0,4 + \frac{1,5 \cdot 0,45 (0,85 - 0,4)^2}{0,85} = 0,56 \text{ м,}$$

$$U_l = \frac{q}{K_l \cdot b_e} = \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{0,803 \cdot 0,56} = 1,12 \cdot 10^{-4},$$

$$U_t = \frac{q^2}{K_t^2 \cdot b_e^2} = \frac{0,5^2 \cdot 10^{-8}}{0,0617^2 \cdot 0,56^2} = 2,1 \cdot 10^{-6},$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{1,12 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(\frac{0,003}{3}\right)^2} = 0,602 \cdot 10^{-2},$$

$$P = -\left(\frac{i}{3}\right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2} = -\left(\frac{0,003}{3}\right)^3 + \frac{0,003 \cdot 1,12 \cdot 10^{-4}}{6} + \frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,105 \cdot 10^{-6},$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot sh \left(\frac{1}{3} Arsh \frac{P}{r^3} \right) = \frac{0,003}{3} - 2 \cdot 0,602 \cdot 10^{-2} \cdot sh \left[\frac{1}{3} Arsh \frac{1,105 \cdot 10^{-6}}{(0,602 \cdot 10^{-2})^3} \right] = -0,929 \cdot 10^{-2},$$

$$\Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l} = \frac{(-0,929 \cdot 10^{-2})^2}{3(-0,929 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 0,929 \cdot 10^{-2} \cdot 0,003 + 1,12 \cdot 10^{-4}} = 0,202,$$

$$\begin{aligned}
M &= (1 - \Phi_1) \cdot \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \cdot \frac{U_t}{K_1^2} = \frac{(1 - 0,202) \cdot 1,12 \cdot 10^{-4}}{-0,929 \cdot 10^{-2}} + \\
&+ (1 - 3 \cdot 0,202) \cdot \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{(-0,929 \cdot 10^{-2})^2} = -0,003 \cdot 10^{-2}, \\
N_1 &= 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2 = 4 \left[(-0,929 \cdot 10^{-2})^2 + 1,12 \cdot 10^{-4} \right] + \\
&+ (-0,929 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = 7,536 \cdot 10^{-4}, \\
h_0 &= L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-\Phi_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}} \cdot \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] = \\
&= 60 \sqrt{\frac{[1,77^3 \cdot 10^{-9} - 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 1,77^2 \cdot 10^{-6} + 1,12 \cdot 10^{-4} \cdot 1,77 \cdot 10^{-3} + 2,1 \cdot 10^{-6}]^{(1-0,202)}}{(1,77 \cdot 10^{-3} + 0,929 \cdot 10^{-2})^{(1-3 \cdot 0,202)}}} \times \\
&\times \exp \left[\frac{0,003 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{7,536 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 1,77 \cdot 10^{-3} - 0,929 \cdot 10^{-2} - 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{7,536 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = 0,83 \text{ м.}
\end{aligned}$$

За итоговое значение примем $h_0 = 0,84$ м.

Несущая способность грунтов земляного полотна с увеличением их влажности уменьшается. Чем на большую величину будет снижен уровень воды в бесполостной дрене, считая от основания балластной призмы, тем более благоприятные условия складываются для напряженного состояния в осушенной части земляного полотна. В табл. 1 приведены результаты гидравлического расчета бесполостных дрен, имеющих одну и ту же длину $L_1 = 60$ м и выполненных из одного и того же

материала щебня фракции 5–20 мм, но имеющих разную форму поперечного сечения. Дрены имеют одну и ту же постоянную по длине высоту, так как они имеют двойное назначение: наряду со снижением уровня воды в земляном полотне они способствуют более благоприятному распределению напряжений в зоне их расположения.

Из данных табл. 1 следует, что трапецидальное сечение более эффективно снижает уровень воды, в том числе благодаря большей площади поперечного сечения. Значительная

ТАБЛИЦА 1. Результаты гидравлического расчета бесполостных дрен

	Форма поперечного сечения	Глубина воды в точке водораздела, м	Величина снижения уровня воды относительно основания балластной призмы, м	Площадь поперечного сечения бесполостной дрены, м ²
1	Трапецидальное	0,50	0,70	1,92
2	Составное	0,84	0,36	1,44
3	Треугольное	0,75	0,45	1,728

площадь поперечного сечения также в большей степени будет способствовать увеличению несущей способности земляного полотна.

Учитывая, что щебень, который используется в качестве заполнителя бесполостных дрен, обладает хорошими фильтрационными свойствами и высокими прочностными характеристиками, в сельском хозяйстве при осушении в слабоводопроницаемых грунтах открытые каналы глубиной до 1 м превращаются в бесполостные коллекторы. Они включаются в состав внутридорожной сети на полях. Бесполостные коллекторы используются одновременно в качестве дороги с односторонним движением техники по кольцевой или сквозной схеме. Для оценки напряжений в заполнителе дрены и окружающем ее грунте, а также осадки по оси дороги (бесполостной дрены) на различной глубине, считая от основания плит, нами был выполнен соответствующий расчет. На рис. 4 представлена расчетная схема.

В табл. 2 указаны физико-механические характеристики грунта, в котором проложен бесполостный коллектор.

За максимальную фактическую нагрузку принято давление от сельскохозяйственного трактора общего назначения 5-го тягового класса К-744 01 («Кировец») с эксплуатационной массой 118 кН.

На рис. 5 представлен фрагмент результатов расчета по следующей схеме нагружения: плиты уложены в два ряда, а нагрузка максимально смещена к правому краю. Край колеса находится над краем правой плиты.

Результаты расчета сведены в табл. 3, в которой для различных глубин приведены значения осадки h на оси дороги.

Результаты расчета свидетельствуют о возможности и целесообразности использования бесполостных дрен для осушения земляного полотна в слабоводопроницаемых грунтах. При этом достигается не только эффективное осушение, но и увеличение несущей способности земляного полотна.

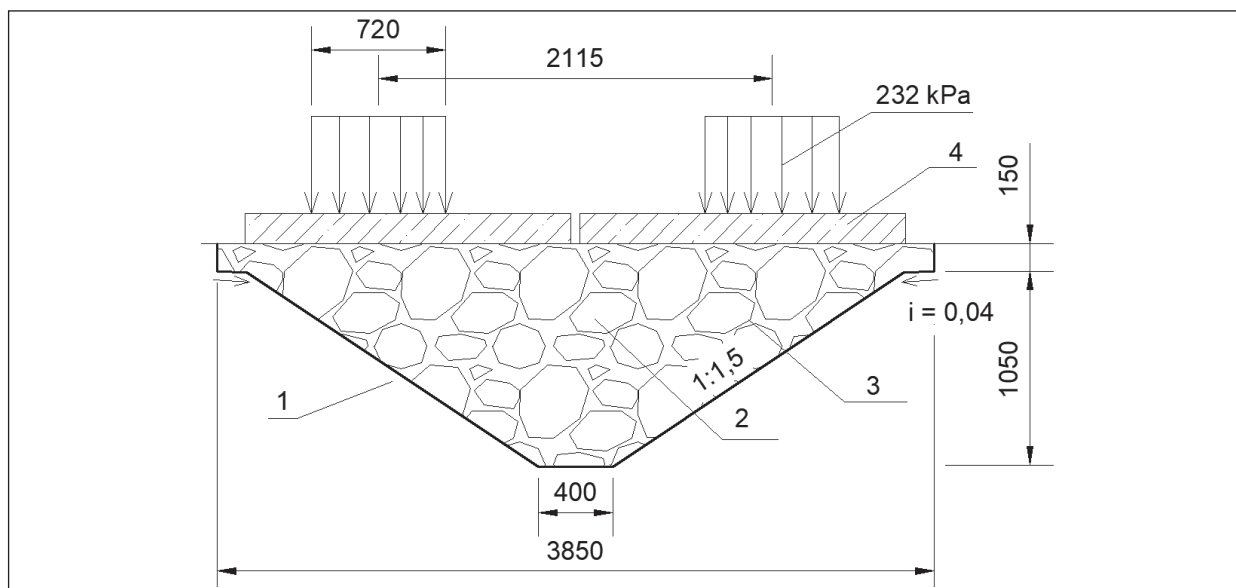


Рис. 4. Полевая дорога, совмещенная с бесполостным коллектором:

1 — мягкопластичный суглинок; 2 — бесполостный коллектор из щебня фракций 5–40 мм; 3 — геотекстиль по периметру бесполостного коллектора; 4 — железобетонная инвентарная плита

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические характеристики грунта

Характеристика	Суглинок мягкопластичный	Щебень
Модуль деформации, МПа	17	40
Объемная масса, т/м ³	1,9	1,35
Угол внутреннего трения, град	19	40
Сцепление, кгс/см ²	0,25	0,02

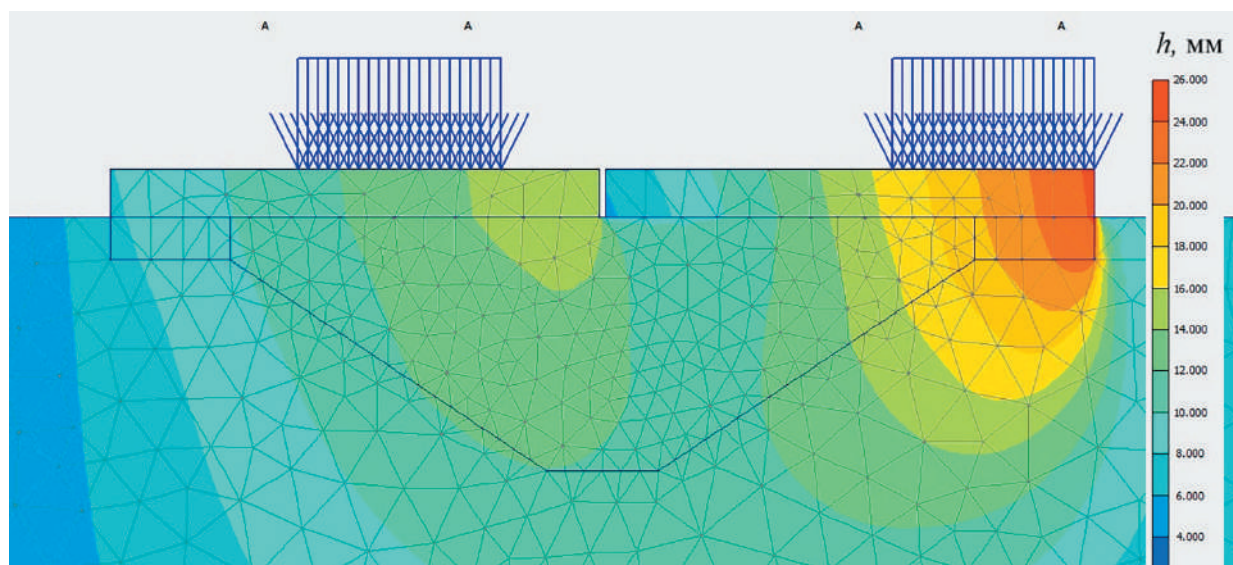


Рис. 5. Фрагмент результата вычисления осадок в грунтовом массиве

ТАБЛИЦА 3. Максимальные осадки на расчетной глубине по результатам расчетов (h)

	Расчетная глубина, считая от нижней грани плиты, м			
	0	0,45	0,9	1,8
Осадки, мм	14	12	10	8

Заключение

1. В связи со снижением континентальности климата на Северо-Западе России в ближайшие 30–50 лет приточность к дренажам, в том числе на железнодорожном транспорте, увеличится на 10–20%. Эффективность осушения земляного полотна может быть существенно увеличена, если для него применять бесполостной дренаж.

2. Форма поперечного сечения бесполостной дрены при прочих равных условиях (длина и высота дрены, крупность заполни-

теля и др.) существенно влияет на величину снижения уровня воды в земляном полотне, считая от основания балластной призмы. Выполненные гидравлические расчеты для дренажных форм поперечного сечения (треугольное, составное и трапецидальное) при одной и той же приточности к дренам показали, что предпочтительным является трапецидальное поперечное сечение.

3. Снижение уровня воды в земляном полотне способствует увеличению его несущей способности. В статье приведен пример

расчета осадок и величин напряжений в земляном полотне в бесполом коллекторе трапецеидального поперечного сечения, который одновременно с отведением притекающего к нему дренажного стока входит в состав внутриводоемной дороги. В качестве нагрузки выбран трактор общего назначения 5-го тягового класса К-744 01 «Кировец» с эксплуатационной массой 118 кН. Результаты расчета свидетельствуют, что применение бесполого дренажа в земляном полотне железных дорог не только обеспечит эффективное осушение, но и увеличит его несущую способность.

Список источников

1. Обоснование технических решений по дренажированию площадок агрегатных блоков АЭС / С.Г. Гордиенко [и др.] // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2003. Т. 242. С. 169–175. EDN IBWHNX
2. Сольский С.В. Вторичное освоение техногенно-нагруженных территорий. Проблемы и решения // СПб.: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 2011. 323 с. EDN KJDQLN
3. Инженерная биология: учебник / Ю. И. Сухо-руких [и др.]. 4-е изд. СПб.: Лань, 2017. 344 с. EDN ZCGEАН
4. Штыков В. И., Янко Ю. Г. Бесполом дренаж периодического профиля // Мелиорация и водное хозяйство. 2009. № 4. С. 35–37. EDN MUTSEV
5. Бесполом дренаж: гидравлическое обоснование, расчет и эффективность действия / В. И. Штыков [и др.] СПб.: Б. и., 1997. 224 с. EDN ZIWSFB
6. Пузыревский Н. П. Фильтрующие насыпи. Л., М.: Госстройиздат, 1934. 169 с.
7. СТО Газпромтранс 1-2012. Технические условия на проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию железных дорог на полуострове Ямал. М.: ЦНИИС, 2012. 109 с.
8. Канцибер Ю. А., Штыков В. И., Пономарев А. Б. Повышение эффективности осушения слабо-допроницаемых грунтов земляного полотна железных дорог // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 14, № 1. С. 43–51. EDN YNBXUN
9. Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils / L. S. Blazhko [et al.] // Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geocology (TGG-2017), Saint Petersburg, May 17–19, 2017. S. Petersburg, 2017. Pp. 710–715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.112. EDN XMYQXF
10. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполом дренажей трапецеидального поперечного сечения, закладываемых с уклоном // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2014. Т. 274. С. 14–21. EDN TPUXGL
11. Штыков В. И., Пономарев А. Б. Гидравлический расчет бесполом дренажей треугольного поперечного сечения при переходном режиме // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, № 3. С. 523–532. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532. EDN ZQMGCB
12. Руководство по мелиорации полей / Г. Г. Гулюк [и др.]. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2007. 238 с. EDN QKYSLF

Дата поступления: 05.03.2026

Решение о публикации: 06.05.2026

Контактная информация:

ШТЫКОВ Валерий Иванович — доктор техн. наук, профессор кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; shtykov41@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; pol1nom@yandex.ru

ЯНКО Юрий Григорьевич — кандидат техн. наук; yanko@agrophys.ru

The Influence of the Shape of the Cross-Section of a Cavity-Free Drain on the Dehumidification Efficiency

V. I. Shtykov¹, A. B. Ponomarev¹, Yu. G. Yanko²

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

²Agrophysical Research Institute, 14 Grazhdansky pr., Saint Petersburg, 195220, Russia

For citation: Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Yanko Yu. G. The Influence of the Shape of the Cross-Section of a Cavity-Free Drain on the Dehumidification Efficiency // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 391–401. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-391-401 (In Russian)

Abstract

Objective: due to the observed trend of decreasing climate continentality in the North-West of Russia in the next 30–50 years, the supply to wastewater disposal systems in railway transport will increase by an average of 10–20%, however, waterlogging is already observed in poorly permeable soils in some periods. Calculations show that the efficiency of drainage of the earth bed can be significantly increased if cavity-free drainage is applied. Caveless drains can be given a different cross-sectional shape, and it is of practical interest to answer the question of how, all other things being equal, this will affect the effectiveness of drainage. **Methods:** the bearing capacity of the soil of the roadbed is influenced by its humidity regime, while increasing the depth of the groundwater position in the roadbed, counting from the base of the sleepers, will also help to increase the bearing capacity of the roadbed. An example of the hydraulic calculation of caveless drains of different cross-sectional shapes is given. **Results:** it was found that of the three different cross-sectional shapes (trapezoidal, composite and triangular), the cavity-free drainage having a trapezoidal cross-sectional shape has the greatest drainage efficiency. At the end of the article, geotechnical calculations of sediments and stresses in soft-plastic loam are performed for the same cross-sectional shape. **Practical significance:** a justification has been obtained for the most effective cross-sectional shape of a cavity-free drainage for drainage of an earth bed from poorly permeable soils.

Keywords: cavity-free drainage, hydraulic calculation, drainage system, reclamation channel

References

1. Gordienko S.G., et al. Obosnovanie tekhnicheskikh reshenij po drenirovaniyu ploshchadok agregatnykh blokov AES [Justification of Technical Solutions for the Drainage of Sites of NPP Aggregate Units], *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Proceedings of the B. E. Vedeneev All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering], 2003, vol. 242, pp. 169–175. EDN IBWHNX (In Russian)

2. Sol'skij S. V. Vtorichnoe osvoenie tekhnogenno-nagruzhenykh territorij. Problemy i resheniya [Secondary Development of Technogenically Loaded Territories. Problems and Solutions], Saint Petersburg,

Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva [B. E. Vedeneev All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering], 2011, 323 p. ISBN 978-5-85529-148-3. EDN KJDQLN (In Russian)

3. Sukhorukikh Yu. I., et al. Inzhenernaya biologiya: uchebnyk, 4-e izdanie [Engineering Biology: A Textbook, 4th edition], Saint Petersburg, Izdatel'stvo lan' [Lan Publishing House], 2017, 344 p. ISBN 978-5-8114-1966-1. EDN ZCGEAH (In Russian)

4. Shtykov V. I., Yanko Yu. G. Bespolostnoj drenazh periodicheskogo profilya [Cavity-Free Drainage of a Periodic Profile], *Melioratsiya i vodnoe khozyajstvo*

[*Land Reclamation and Water Management*], 2009, no. 4, pp. 35–37. EDN MUTSEV (In Russian)

5. Shtykov V. I., et al. Bespolostnoj drenazh: gidravlichesкое обоснование, raschet i effektivnost' dejstviya [Cavity-Free Drainage: Hydraulic Justification, Calculation and Effectiveness of Action], Saint Petersburg, B. i., 1997, 224 p. EDN ZIWSFB (In Russian)

6. Puzyrevskij N. P. Fil'triruyushchie nasypi [Filtering Mounds], Leningrad–Moscow, Gosstrojizdat, 1934, 169 p. (In Russian)

7. STO Gazpromtrans 1-2012. Tekhnicheskie usloviya na proektirovanie, stroitel'stvo i vvod v ekspluatatsiyu zheleznykh dorog na poluostrove Yamal [Gazpromtrans Organization Standard 1-2012. Technical Specifications for the Design, Construction and Commissioning of Railways on the Yamal Peninsula], Moscow, Central Research Institute of Communications, 2012, 109 p. (In Russian)

8. Kantsiber Yu.A., Shtykov V. I., Ponomarev A.B. Povyshenie effektivnosti osusheniya slabovodopronitsaemykh gruntov zemlyanogo polotna zheleznykh dorog [Improving the Efficiency of Drainage of Poorly Permeable Soils of the Railway Trackbed], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2017, vol. 14, no. 1, pp. 43–51. EDN YNBXUN (In Russian)

9. Blazhko L. S., et al. Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils, *Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG-2017)*, Saint Petersburg, 2017, pp. 710–715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.112. EDN XMYQXF

10. Shtykov V. I. Gidravlicheskiy raschet bespolostnykh dren trapetseidal'nogo poperechnogo secheniya, zakladyvaemykh s uklonom [Hydraulic

Calculation of Hollow Drains of Trapezoidal Cross Section Laid with a Slope], *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva [Proceedings of the B. E. Vedeneev All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering]*, 2014, vol. 274, pp. 14–21. EDN TPUXGL (In Russian)

11. Shtykov V. I., Ponomarev A. B. Gidravlicheskiy raschet bespolostnykh dren treugol'nogo poperechnogo secheniya pri perekhodnom rezhime [Hydraulic Calculation of Hollow Triangular Cross-Sectional Drains in Transition Mode], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 523–532. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532. EDN ZQMGCB (In Russian)

12. Gulyuk G. G., et al. Rukovodstvo po melioratsii polej [Field Reclamation Guide], Saint Petersburg, *Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]*, 2007, 238 p. ISBN 5-7422-1551-7. EDN QKYSLF (In Russian)

Received: March 05, 2026

Accepted: May 06, 2026

Author's information:

Valerij I. SHTYKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department “Water Supply, Sanitation and Hydraulics”;
shtykov41@mail.ru

Andrej B. PONOMAREV — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Water Supply, Sanitation and Hydraulics”; pol1nom@yandex.ru

Yurij G. YANKO — PhD in Engineering;
yanko@agrophys.ru

УДК 624.19.035.2

Сравнительный анализ методов оценки начальных смещений призабойной области в условиях малопрочных полускальных грунтов

В. Н. Кавказский, Е. А. Ермонин

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

Для цитирования: *Кавказский В. Н., Ермонин Е. А.* Сравнительный анализ методов оценки начальных смещений призабойной области в условиях малопрочных полускальных грунтов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 402–416. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-402-416

Аннотация

Статья посвящена сравнительному анализу и разработке методики учета пространственной схемы деформирования пород призабойной области в плоской расчетной схеме тоннеля с учетом технологических особенностей в конкретных инженерно-геологических условиях. **Объект исследования:** напряженно-деформированное состояние системы «грунтовый массив — выработка — крепь». **Предмет исследования:** величина смещений призабойной области, реализующихся до устройства крепи выработки. **Цель:** на основе сравнительного анализа существующих методик и трехмерного численного моделирования определить долю начальных смещений контура выработки до устройства крепи для тоннелей, сооружаемых горным способом в малопрочных полускальных грунтах, и разработать практические рекомендации по ее учету в упрощенных плоских расчетных схемах. **Методы:** для достижения цели использован комплекс методов, включающий теоретический анализ существующих эмпирических и аналитических подходов, верифицированный посредством трехмерного конечно-элементного моделирования с учетом полной стадийности строительства и нелинейного поведения грунтов (модели Хука — Брауна и Hardening Soil) на реальном объекте — тоннеле в Сочи с последующим сравнительным количественным анализом результатов и синтезом методики для плоских расчетных схем. **Результаты:** на основе трехмерного численного моделирования проходки тоннеля установлено, что в условиях малопрочных полускальных грунтов Сочи начальные смещения контура выработки до устройства крепи составляют 40% от конечных полных смещений, что значительно отличается от оценок, полученных по существующим эмпирическим формулам (22–60%). Данный результат был верифицирован на реальном объекте и лег в основу практической методики учета пространственного деформирования в плоских расчетных схемах (аналог β -метода), выявив при этом существенные пробелы в нормативных подходах к оценке горного давления. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют внедрить в проектную практику обоснованную методику (аналог β -метода) для перехода от ресурсоемкого 3D-моделирования к упрощенным 2D-расчетам с учетом реального взаимодействия массива и крепи, напрямую влияя на безопасность, экономичность и надежность проектных решений для тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: горное давление, автодорожный тоннель, горный способ, пространственная схема деформирования, профиль вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля, конвергенция, β -метод

Введение

Строительство автодорожных тоннелей горным способом в сложных инженерно-геологических условиях, характерных для мно-

гих регионов России, включая Черноморское побережье Кавказа, сопряжено с необходимостью точной оценки взаимодействия грунтового массива и постоянной крепи. Ключевой

проблемой при проектировании является корректное определение той части горного давления, которая перераспределяется в окружающем массиве до момента устройства обделки, то есть начальных смещений контура выработки (U_0). Недоучет этих смещений в расчетах приводит к завышению нагрузок на крепь, ее перепроектированию и удорожанию, а в некоторых случаях — к недооценке деформаций и риску возникновения аварийных ситуаций. Классические плоские (2D) расчетные схемы, остающиеся основным инструментом проектировщика ввиду их наглядности и быстроты выполнения, по своей сути не могут учесть пространственный характер работы призабойной области, где незакрепленный участок выработки позади забоя играет роль естественного разгружающего конструктивного элемента.

Для учета этого эффекта в мировой и отечественной практике разработан ряд теоретических и эмпирических подходов, основанных на концепции продольного профиля деформаций (Longitudinal Displacement Profile). К ним относятся метод коэффициента снижения начального давления (α^*), представленный в работах Б.З. Амусина [4], М. Баудендистела [1, 4], а также графико-аналитические методы, связывающие величину предварительных смещений с размером зоны пластичности (N. Vlachopoulos, M.S. Diederichs [2, 3]). Однако применимость этих методов, полученных часто для иных горно-геологических условий, к малопрочным, обводненным и сейсмичным полускальным грунтам требует тщательной верификации. Существует выраженный методический пробел между точным, но трудоемким трехмерным (3D) моделированием, способным адекватно воспроизвести процесс проходки, и потребностями повседневной проектной практики, оперирующей упрощенными плоскими моделями.

Целью настоящего исследования является количественная оценка доли начальных смещений контура выработки для условий строительства в малопрочных полускальных грунтах на примере автодорожных тоннелей Сочи и разработка на этой основе практической методики для учета пространственного деформирования в стандартных плоских расчетных схемах. Для ее достижения были последовательно решены следующие задачи:

- выполнение детального конечно-элементного 3D-моделирования с воспроизведением полной стадийности проходки тоннеля;
- сравнительный анализ результатов моделирования с прогнозами, полученными по существующим аналитическим и эмпирическим методам;
- формализация алгоритма корректировки плоской расчетной схемы на основе полученных количественных данных.

Научная новизна работы заключается в установлении для конкретного типа грунтов (слабые аргиллиты сочинской свиты) экспериментально обоснованного соотношения между начальными и конечными смещениями, а также в адаптации концепции β -метода для корректного учета этого соотношения в двумерных геотехнических моделях.

Практическая ценность исследования состоит в предоставлении проектировщикам обоснованного инструментария, позволяющего повысить достоверность плоских расчетов тоннельных обделок без перехода к ресурсоемкому трехмерному моделированию на всех этапах проектирования, что в итоге способствует оптимизации конструкций и повышению безопасности строительства.

Структура статьи включает обзор методов оценки начальных смещений, описание инженерно-геологических условий и технологии строительства объекта-прототипа (тоннели

№ 5/5а дублера Курортного проспекта), изложение методики 3D-моделирования и сравнительного анализа, представление и обсуждение ключевых результатов, выводы и рекомендации для проектной практики.

Обзор существующих методов оценки начальных смещений призабойного массива

Хорошо известно, что схема деформирования пород призабойной области при строительстве тоннелей горным способом носит пространственный характер, так как до устройства крепи выработки часть горного давления воспринимает окружающий массив грунта [1–3]. Характерный профиль вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля, сооружаемого горным способом, представлен на рис. 1.

До начала проходческих работ грунтовый массив находится в состоянии естественного (природного) равновесия, определяемого действием гравитационных и тектонических сил. Проходка подземной выработки кардинально нарушает это равновесие. В прилегающем массиве происходит сложное **перераспределение напряжений**: возникает их концентрация на флангах выработки и разгрузка в кровле и лотке. Грунт на контуре получает возможность сместиться в образовавшуюся полость, что может привести к его обрушению или пластическому течению. Формирование нового устойчивого напряженно-деформированного состояния системы «выработка — массив», сопровождающееся смещениями и деформациями породы, представляет собой **проявление горного давления**. Силовое воздействие,

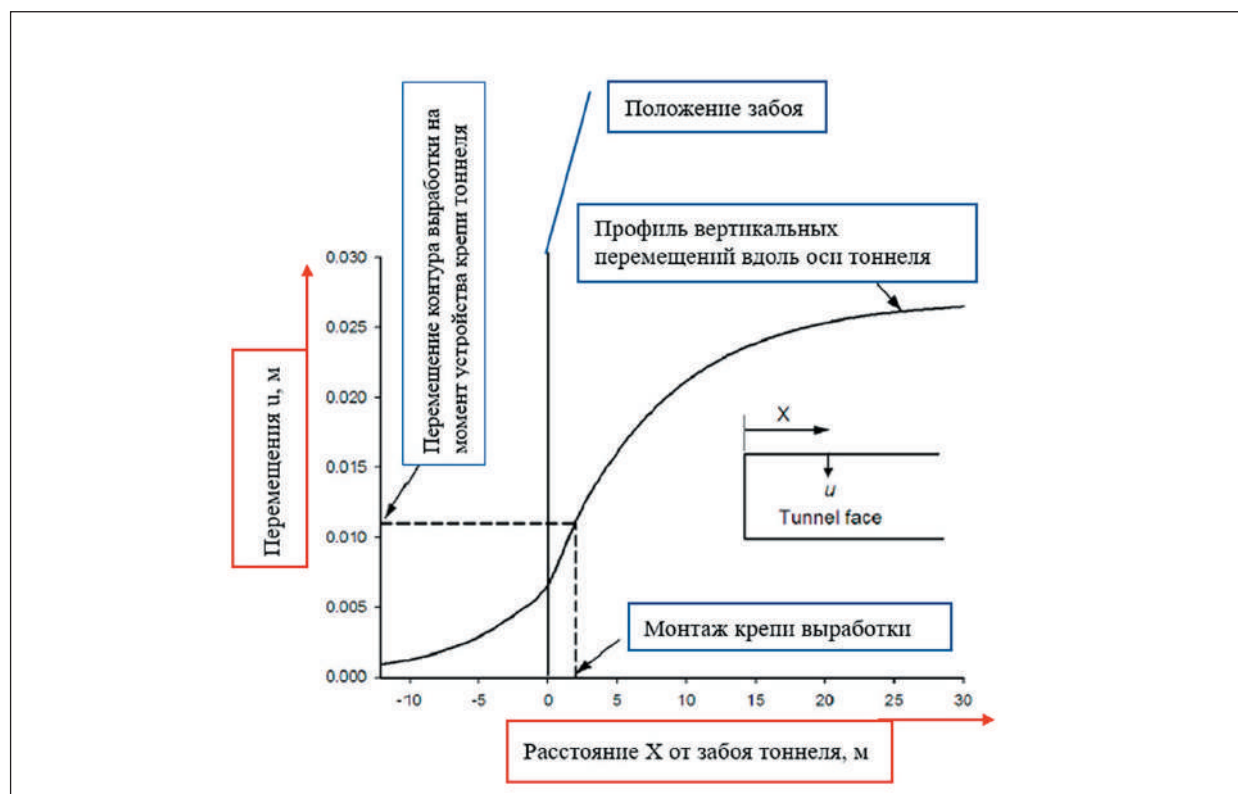


Рис. 1. Профиль вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля пролетом 12 м, сооружаемого горным способом [2]

которое в установившемся состоянии воспринимает крепь выработки, определяется как **горное давление на обделку**. Величина этой нагрузки является результатом сложного силового взаимодействия в системе «грунтовый массив — крепь» и зависит как от жесткости самой конструкции, так и от стадии проходки и времени установки крепи относительно забоя.

Диаграмма взаимодействия массива и крепи (рис. 2) наглядно иллюстрирует процесс формирования нагрузки на обделку [4, 5]. Кривая 1 отражает реакцию грунтового массива после проходки выработки, показывая зависимость между смещением контура u и давлением p , которое могло бы его вызвать. В момент, когда смещение незакрепленного контура достигает величины U_0 , устанавливается крепь. Ее **жесткость** характеризуется линией 2: чем круче ее наклон, тем менее податлива конструкция.

Точка пересечения А определяет состояние конечного равновесия системы «крепь — массив», соответствующее фактической нагрузке на обделку P_A и остаточному смещению u_A . Если экстраполировать линейный участок

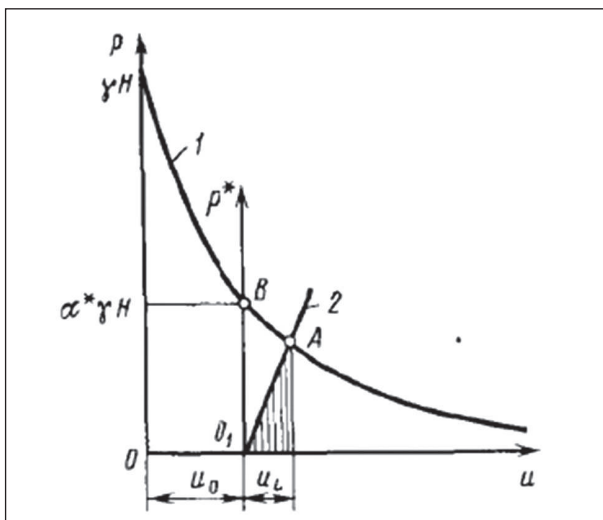


Рис. 2. Диаграмма взаимодействия массива пород с крепью [4, 5]

кривой 1 массива (отрезок от точки А) до пересечения с осью давления, мы получим точку В. Ордината этой точки соответствует **приведенному начальному напряжению** $\alpha^* \gamma H$, которое является расчетной величиной, используемой в упрощенных методах для учета перераспределения усилий в массиве до установки крепи. Коэффициент α^* ($0 < \alpha^* < 1$) формально показывает, какая доля от полного геостатического давления γH в итоге воспринимается крепью с учетом произошедших предварительных смещений U_0 .

Доктор технических наук Б.З. Арусин на основании обработки результатов натурных исследований за смещения пород в выработках предложил следующую эмпирическую формулу для определения α^* [4]:

$$\alpha^* = \exp\left(\frac{-1,3l}{R}\right), \quad (1)$$

где l — расстояние от вводимой в работу крепи до забоя;

R — средний радиус выработки, то есть радиус круговой выработки той же площади поперечного смещения.

Однако следует заметить, что вышеуказанная формула дает завышенные значения множителя α^* , так как не учитывает деформации пород впереди забоя выработки [рис. 3, 1, 4]: при $l = 0$, $\alpha^* = 1,0$.

Исследования деформаций массива в призабойной области выработки выполнил доктор М. Баудендистел (Baudendistel) с использованием метода конечных элементов [1, 4]. По итогу получена формула:

$$\alpha^* = 0,64 \exp\left(\frac{-1,75l}{R}\right). \quad (2)$$

В зарубежных источниках также представлены исследования по данной тематике. Так, в работах [2, 3, 6, 7] представлен анализ профиля вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля

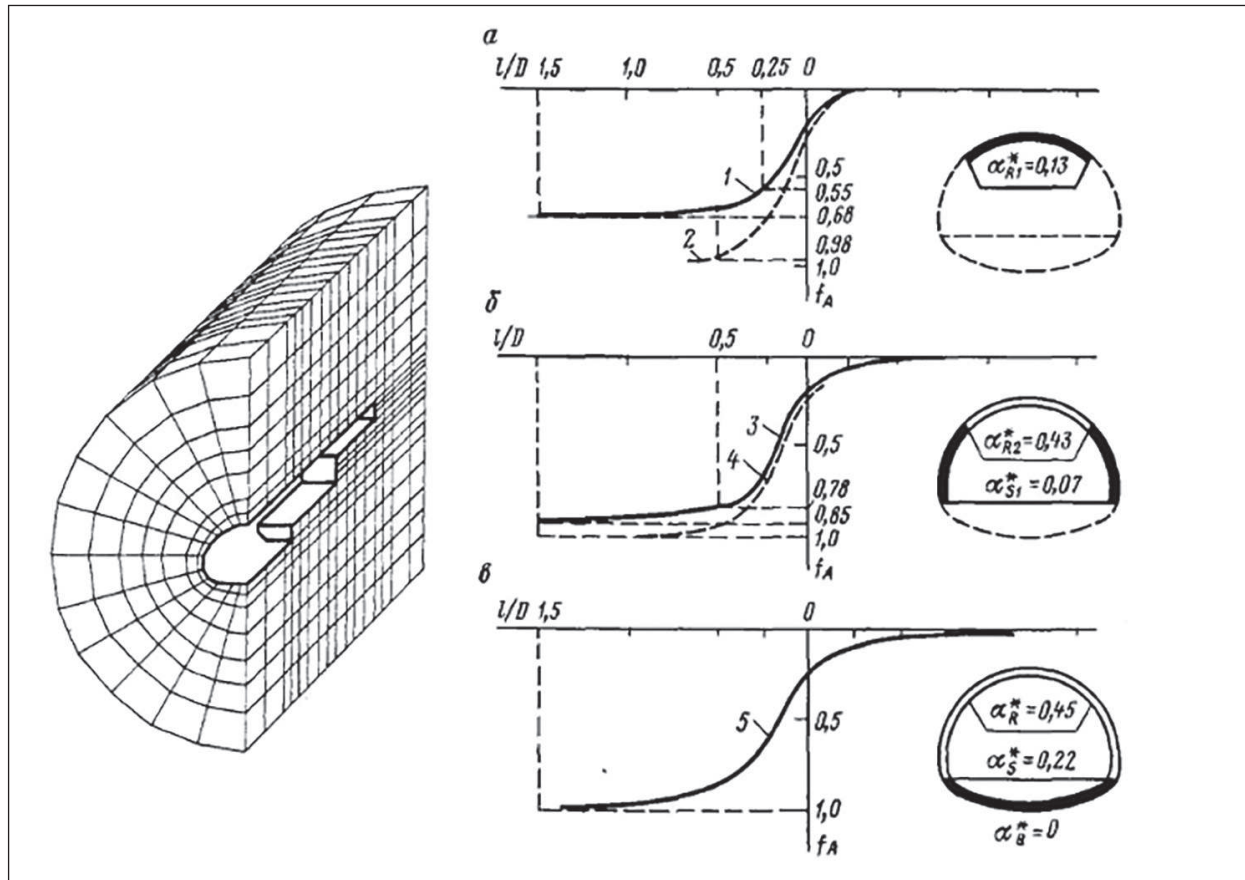


Рис. 3. Объемная модель метода конечных элементов и смещение поверхности тоннеля в призабойной зоне по мере раскрытия сечения в исследованиях доктора М. Баудендистела [1, 4]: *a* — калотта; *б* — штросса; *в* — лоток; 1, 2 — смещение свода при проходке калотты и штроссы; 3, 4 — смещение стен при раскрытии штроссы и ядра; 5 — смещение обратного свода

(Longitudinal Displacement Profiles), основанный на размере зоны пластических деформаций призабойной области и величине перемещений неукрепленной выработки.

Таким образом, в инженерной практике существуют **три основных подхода к оценке U_0** : два аналитических, основанных на коэффициенте α^* , и один графико-аналитический, использующий кривые LDP. Их применимость и точность для конкретных инженерно-геологических условий, таких как малопрочные полускальные грунты Сочи, требуют отдельного сравнительного анализа, результаты которого представлены в данной работе.

Практическая часть: расчет и анализ начальных смещений на примере тоннелей дублера Курортного проспекта (Сочи)

В практической части представлен расчет и анализ профиля вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля на примере конкретного объекта — транспортные тоннели № 5/5а дублера Курортного проспекта Сочи.

Дублер Курортного проспекта, ключевым элементом которого являются рассматриваемые тоннели, представляет собой магистраль непрерывного движения категории I-A (СП 396.1325800.2018) с расчетной скоростью 75 км/ч. Четыре полосы движения

(по 2 в каждом тоннеле) шириной 3,75 м и габарит приближения строения определяют большую площадь поперечного сечения выработки, что существенно влияет на масштаб перераспределения напряжений в массиве [8–11].

Трасса дублера проложена в условиях сложного горного рельефа, примерно в 1–3 км от побережья Черного моря и исторической магистрали — Курортного проспекта. Наиболее ответственным участком являются транспортные тоннели № 5 и № 5а, расположенные в Центральном районе Сочи. Их строительство в условиях плотной городской застройки требовало особого контроля за деформациями. Основные параметры тоннелей:

- длина: 670,5 м (тоннель № 5) и 695,7 м (тоннель № 5а);
- глубина заложения: варьируется от 10 до 55 м в зависимости от рельефа;
- период строительства: 2010–2013 годы.

Инженерно-геологические условия площадки отличаются высокой сложностью. Тон-

нели проходят в отложениях сочинской свиты, представленных малопрочными аргиллитами с прочностью на одноосное сжатие от 1,6 до 6,1 МПа, склонными к размягчению при обводнении. Массив перекрыт толщей техногенных и делювиально-оползневых грунтов (рис. 4). Дополнительным фактором риска является расчетная сейсмичность площадки 9 баллов.

Такое сочетание урбанизированной среды и сложного рельефа определило **высокие требования к точности прогноза горного давления и смещений призабойного массива**.

Строительство тоннелей велось встречными забоями уступным способом. Уступный способ представляет собой последовательную поэтапную разработку поперечного сечения тоннеля, при которой каждый предыдущий уступ служит опорой для крепи свода и обеспечивает устойчивость контура до возведения постоянной обделки. Данный метод был выбран для строительства в сложных инженерно-геологических условиях Сочи, так как

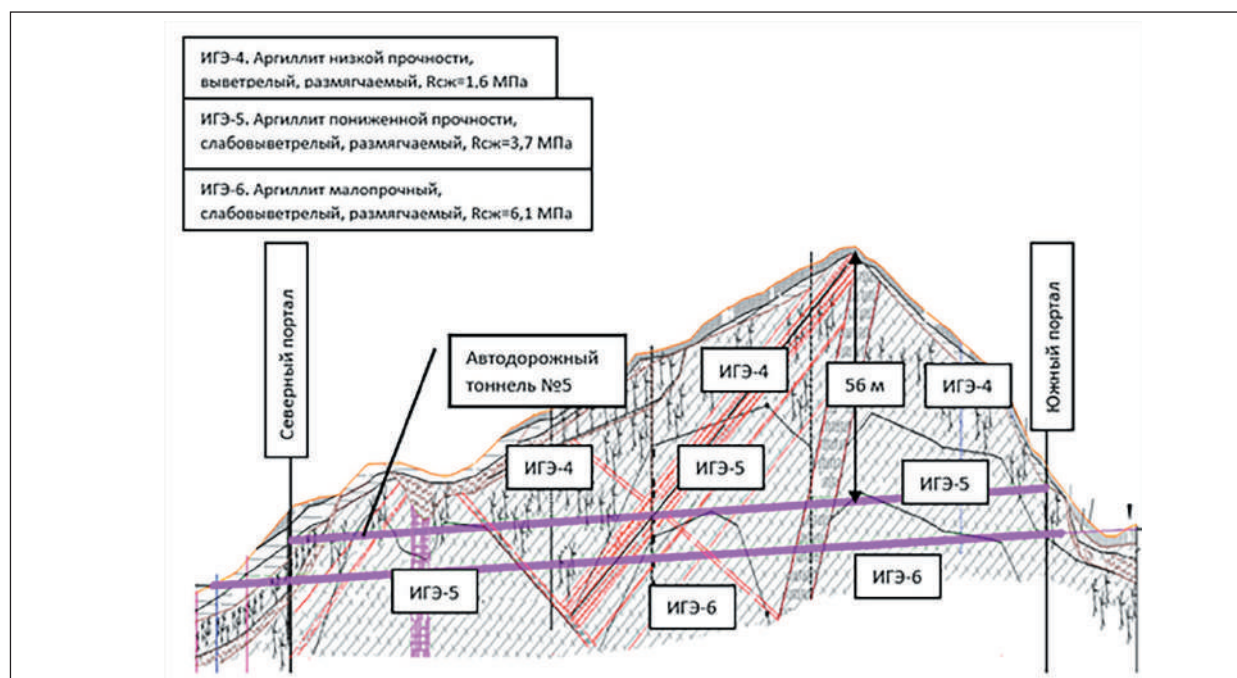


Рис. 4. Продольный геологический профиль тоннеля № 5

позволяет минимизировать площадь одновременно незакрепленного выработкой массива и контролировать деформации.

Общая схема организации работ по сооружению тоннелей и основные этапы строительства представлены на рис. 5–6.

1. Проходка верхнего уступа (калотты).

В первую очередь разрабатывается сводовая часть тоннеля на полную ширину. Сразу после выемки грунта сооружается временная крепь из набрызг-бетона (торкрета) и стальных рам, формирующая несущую калотту. Эта конструкция работает как самостоятельная арочная система, опирающаяся на нетронутый грунт в средней части (ядро) и воспринимающая давление вышележащего массива. Данный этап критически важен для стабилизации кровли.

2. Проходка среднего уступа (штресс).

После стабилизации свода разрабатываются

боковые части (штрессы), как правило, с опережением одного уступа относительно другого для сохранения симметрии нагрузки. На этом этапе происходит постепенная разгрузка ядра и передача веса калотты на возводимые боковые стенки временной крепи.

3. Проходка нижнего уступа.

На последнем этапе разрабатывается обратный свод. После этого возводится постоянная монолитная обделка, которая воспринимает полную нагрузку от горного давления.

Данная схема организации работ наглядно иллюстрирует пространственно-временную логику реализации уступного способа. Схема демонстрирует цикличность процесса и критически важное расстояние между забоями разных уступов, которое определяет степень пространственного взаимодействия массива с крепью и величину начальных смещений U_0 .

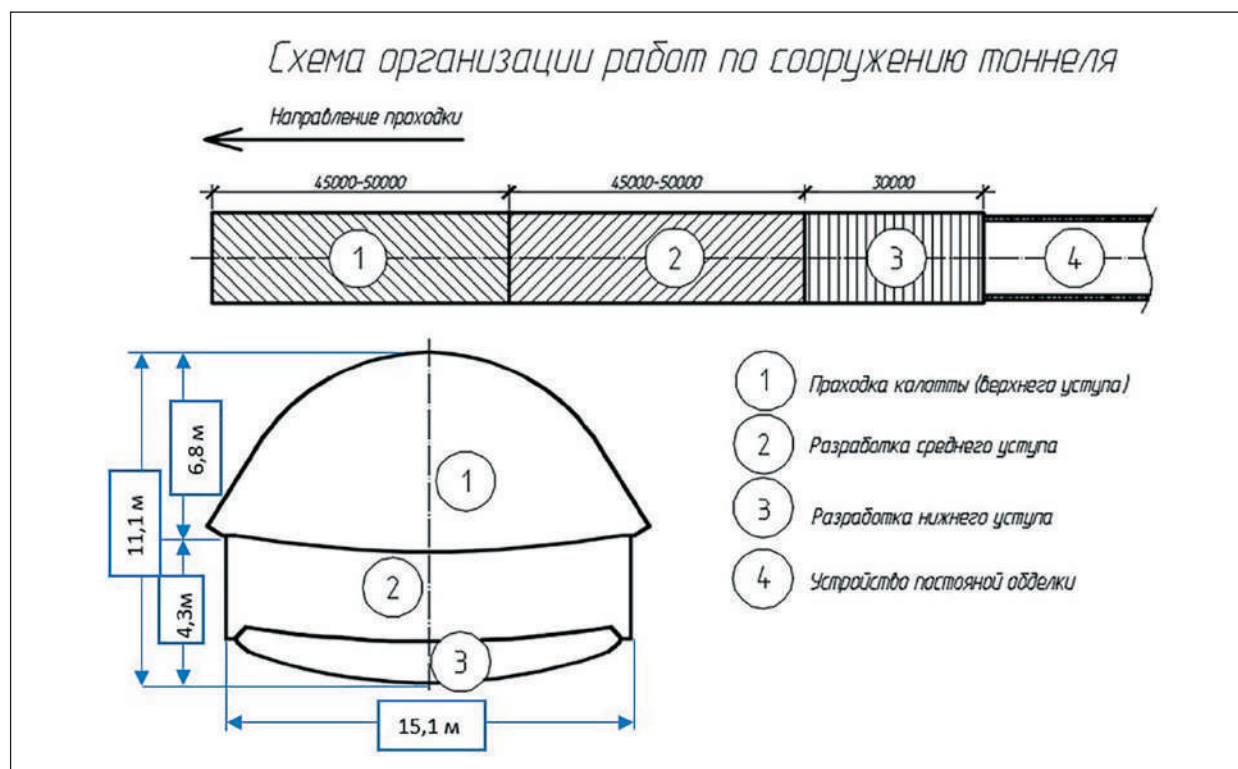


Рис. 5. Общая схема организации работ по сооружению тоннелей № 5/5а



Рис. 6. Основные этапы строительства автодорожных тоннелей № 5/5а дублера Курортного проспекта в Сочи. Фото: Е. А. Ермолина

Методика исследований

Трехмерное конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив — выработка — крепь» выполнено в программном комплексе Plaxis 3D. В расчетах использовались математические модели грунта Hoek — Brown и Hardening Soil для описания нелинейного деформирования малопрочных полускальных грунтов сочинской свиты. Стадийность строительства воспроизведена по фактической технологии уступной проходки (калотта, ядро, штроссы, нижний уступ, устройство постоянной обделки) через последовательную активацию и деактивацию элементов. Расчетная область включает массив грунта,

выработку тоннеля, временную и постоянную крепь с учетом реальной глубины заложения и рельефа (рис. 7).

На основе результатов расчета (рис. 8) построен продольный профиль вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля, по которому определены начальные смещения U_0 (за незакрепленным забоем) и конечные смещения U_∞ (при установившемся напряженно-деформированном состоянии). Относительная доля начальных смещений U_0/U_∞ сопоставлена с оценками, полученными по методикам Амусина, Баудендистела и Vlachopoulos — Diederichs.

Следует отметить, что трехмерная численная модель построена для конкретного объекта

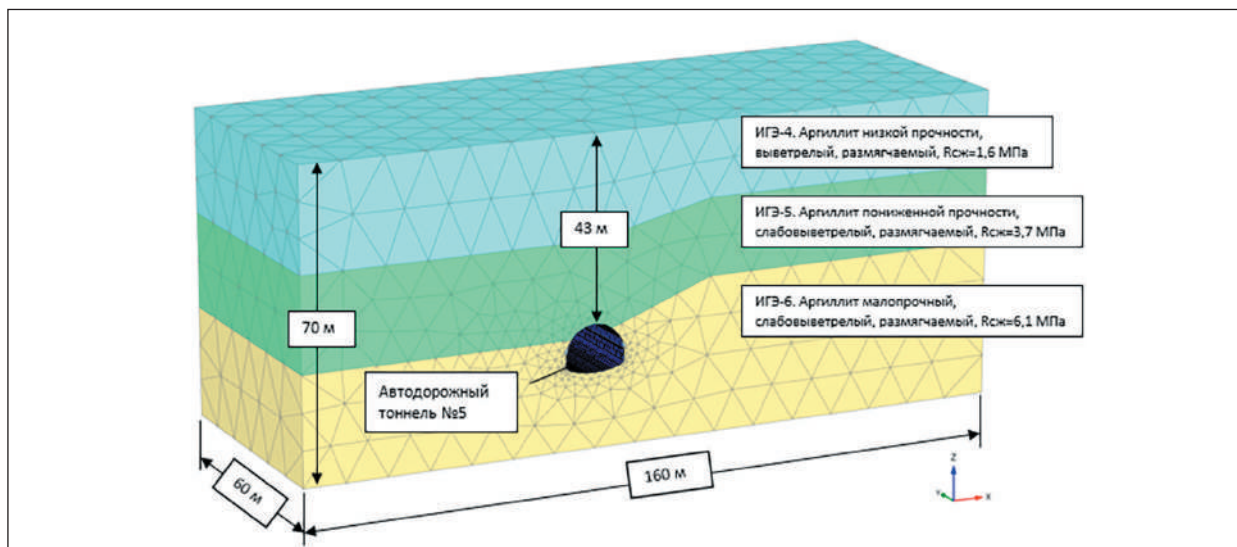


Рис. 7. Общий вид пространственной расчетной схемы тоннеля

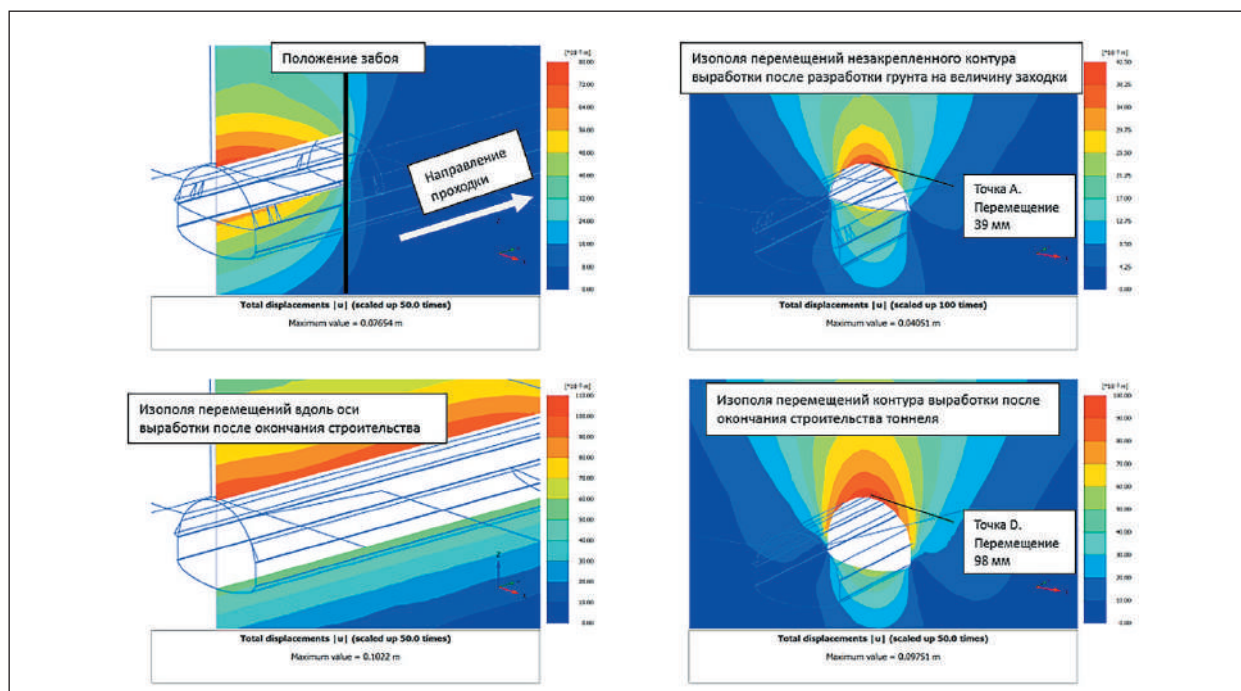


Рис. 8. Результаты трехмерной конечно-элементной расчетной схемы. Развитие перемещений по мере проходки тоннеля в продольном (слева) и поперечном (справа) сечениях

и указанных инженерно-геологических условий, поэтому прямой перенос полученной доли U_0/U_∞ на другие объекты возможен только после дополнительной верификации расчетов или натуральных наблюдений.

Результаты моделирования

На основе анализа вышеуказанной пространственной схемы строится профиль вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля (рис. 9).

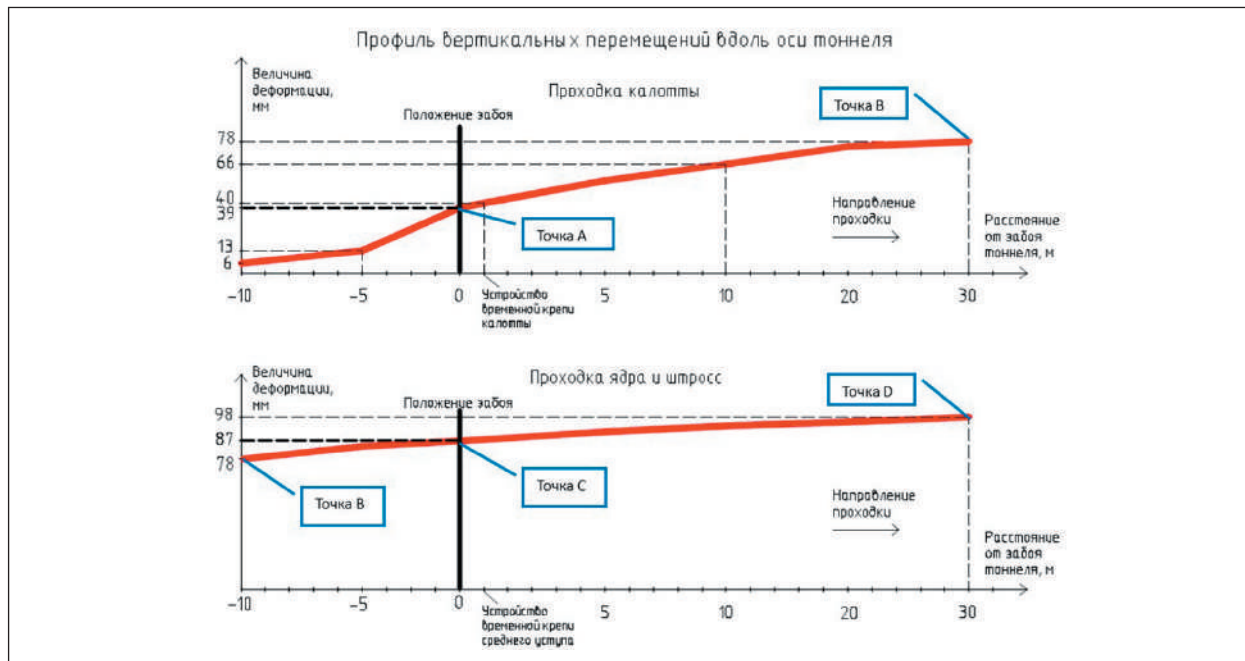


Рис. 9. Профиль вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля.
Сверху — проходка калотты, снизу — проходка ядра и штросс

Профиль вертикальных перемещений вдоль оси тоннеля представлен на рис. 9. На данном профиле есть ряд характерных точек:

- точка А — перемещения незакрепленного контура выработки после разработки грунта верхнего уступа на величину заходки. Перемещение в точке А — 39 мм;
- точка В — перемещения контура выработки после проходки 30 м верхнего уступа тоннеля от рассматриваемого забоя. Перемещение в точке В — 78 мм. Дальнейшее удаление от рассматриваемого забоя не приводит к увеличению перемещений в точке В;
- точка С — перемещения контура выработки после разработки грунта ядра и штросс тоннеля на величину заходки. Перемещение в точке С — 87 мм;
- точка D — перемещения контура выработки после проходки 30 м среднего уступа тоннеля от рассматриваемого забоя. Дальнейшее удаление от рассматриваемого забоя не приводит

к увеличению перемещений в точке D. Перемещение в точке D — 98 мм, и это является конечным значением.

Таким образом, можно сделать вывод, что начальные смещения незакрепленного контура выработки составляют 40% от конечного значения:

$$\frac{\text{перемещения точки } A}{\text{перемещения точки } D} = \frac{39 \text{ мм}}{98 \text{ мм}} = 0,40.$$

Если рассматривать отдельно проходку калотты, ядра и штросс, то получатся следующие значения начальных смещений:

- при проходке калотты начальные смещения незакрепленного контура выработки составляют 50% от конечного значения:

$$\frac{\text{перемещения точки } A}{\text{перемещения точки } B} = \frac{39 \text{ мм}}{78 \text{ мм}} = 0,5;$$

- при проходке ядра и штросс — 45% от конечного значения:

$\frac{\text{перемещение точки } C - \text{перемещение точки } B}{\text{перемещение точки } D - \text{перемещение точки } B} =$

$$= \frac{87\text{мм} - 78\text{мм}}{98\text{мм} - 78\text{мм}} = \frac{9\text{мм}}{20\text{мм}} = 0,45.$$

Для сопоставления результатов обратимся к методикам, указанным в обзоре вопроса исследования. Использование формулы (1) Б. З. Амусина дает следующую величину α^* :

$$\alpha^* = \exp\left(\frac{-1,3l}{R}\right) = \exp\left(\frac{-1,3 \cdot 1,2}{6,4}\right) = 0,78,$$

где $l = 1,2$ м;

$R = 6,4$ м — эквивалентный радиус выработки.

Соответственно, согласно [4]:

$$\frac{u_0}{u_\infty} = 1 - \alpha^* = 1 - 0,78 = 0,22 \Rightarrow u_0 = 0,22u_\infty.$$

То есть, согласно формуле доктора Б. З. Амусина, начальные смещения незакрепленного контура выработки составляют 22% от конечного значения.

Использование формулы (2) доктора М. Баудендистела (Baudendistel):

$$\begin{aligned} \alpha^* &= 0,64 \exp\left(\frac{-1,75l}{R}\right) = \\ &= 0,64 \exp\left(\frac{-1,75 \cdot 1,2}{6,4}\right) = 0,46. \end{aligned}$$

Соответственно, согласно [4]:

$$\frac{u_0}{u_\infty} = 1 - \alpha^* = 1 - 0,46 = 0,54 \Rightarrow u_0 = 0,54u_\infty.$$

То есть, согласно формуле доктора М. Баудендистела (Baudendistel), начальные смещения незакрепленного контура выработки составляют 54% от конечного значения.

Согласно методике N. Vlachopoulos, M. S. Diederichs, представленной в [2, 3, 7] и основанной на размере зоны пластических деформаций

призабойной области, начальные смещения незакрепленного контура выработки составляют 60% от конечного значения.

Результаты всех вышепредставленных расчетов сведены в таблице.

ТАБЛИЦА. Начальные смещения незакрепленного контура выработки U_0 призабойной области при строительстве автодорожного тоннеля горным способом в малопрочных полускальных грунтах Сочи

	Методика расчета	Величина (% от конечного значения)
1	Трехмерный численный анализ с учетом стадийности проходки тоннеля	40%*
2	Формула д-ра техн. наук Б. З. Амусина	22%
3	Формула д-ра М. Баудендистела (Baudendistel)	54%
4	Методика N. Vlachopoulos, M. S. Diederichs	60%

* **Примечание.** Если рассматривать проходку калотты, ядра и штросс **раздельно**, то при проходке калотты начальные смещения незакрепленного контура выработки составляют 50% от конечного значения, при проходке ядра и штросс — 45% от конечного значения.

Заключение

1. По результатам трехмерного моделирования с учетом реальной стадийности проходки тоннелей № 5/5а установлено, что начальные смещения незакрепленного контура выработки U_0 в условиях малопрочных полускальных грунтов сочинской свиты составляют порядка 40% от конечных смещений U_∞ .

2. Сравнение с существующими методиками показало, что формулы Б. З. Амусина, М. Баудендистела и Vlachopoulos — Diederichs дают значения U_0/U_∞ в диапазоне 22–60%, что приводит к существенным расхождениям с результатами 3D-анализа и подтверждает необходимость локальной верификации данных методов для конкретных инженерно-геологических условий.

3. Полученные результаты позволяют внедрить в проектную практику обоснованную методику (аналог β -метода) для перехода от ресурсоемкого 3D-моделирования к упрощенным 2D-расчетам.

Экспериментально обоснованная доля начальных смещений $U_0/U_\infty \approx 0,40$ используется для приведения исходного горного давления к плоской расчетной схеме. Суть предлагаемой методики схематично представлена на рис. 10.

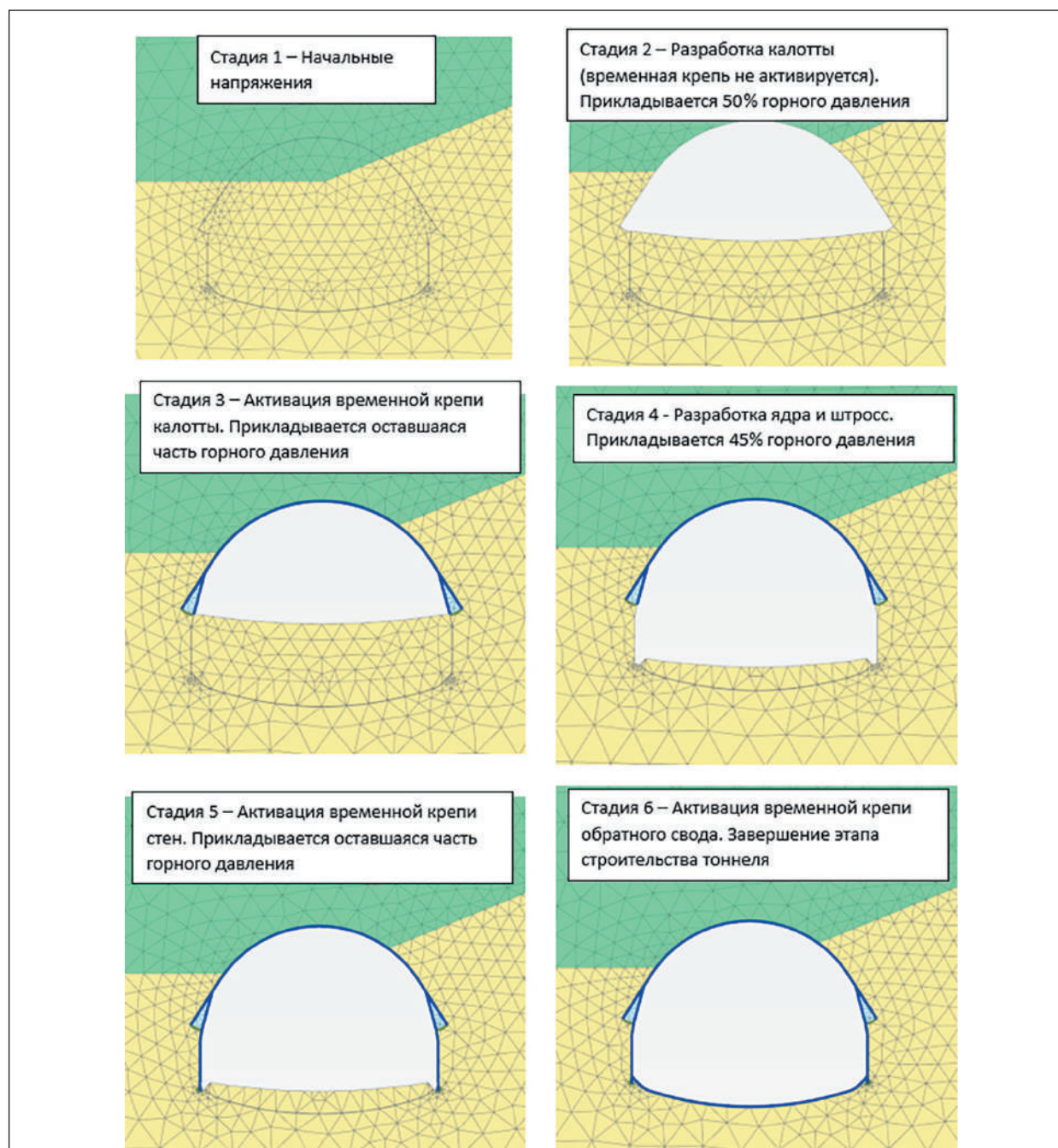


Рис. 10. Предлагаемая практическая методика учета пространственного деформирования пород призабойной области в плоской расчетной схеме тоннеля

Список источников

1. Булычев Н. С., Фотиева Н. Н., Стрельцов Е. В. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок. М.: Недра, 1986. 288 с.
2. Kersten Lecture: Integration of Geotechnical and Structural Design in Tunnelling / E. C. Hoek [et al.] // Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference. Minneapolis, 29 February 2008. Pp. 1–53. URL: https://www.d.umn.edu/~carranza/KL08/%5B2008%5D_EH_et_al_%5BKersten-UofM-conference%5D.pdf (дата обращения: 20.04.2026).
3. Vlachopoulos N., Diederichs M. S. Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2009. No. 42. Pp. 131–146. DOI: 10.1007/s00603-009-0176-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/226038756_Improved_Longitudinal_Displacement_Profiles_for_Convergence_Confinement_Analysis_of_Deep_Tunnel (дата обращения: 20.04.2026).
4. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1994. 382 с.
5. Фролов Ю. С., Иванес Т. В. Механика подземных сооружений: учебное пособие. СПб.: ПГУПС, 1997. 102 с.
6. Brinkgreve R. B. J. Ground Response Analysis in PLAXIS 2D. Delft: Plaxis BV, 2015.
7. Hoek E., Brown E. T. Practical Estimates of Rock Mass Strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997. No. 34. Pp. 1165–1186. URL: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X) (дата обращения: 20.04.2026).
8. Кавказский В. Н., Ермонин Е. А., Андреева Л. А. Анализ аварийных ситуаций при сооружении автодорожных тоннелей горным способом в инженерно-геологических условиях г. Сочи // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, вып. 4. С. 947–957. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-947-957
9. Стройпроект. Три десятилетия. 1990–2020. URL: <https://www.stpr.ru/upload/iblock/020/zcmb98m54647mljd1j1pbdyk7vnvu2hu/%D0%9A%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0%20%D0%BA%2030-%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%8E.pdf> (дата обращения: 20.04.2026).
10. ФКУ Упрдор «Черноморье». URL: <https://chnm.rosavtdor.gov.ru/department/press-center/novosti/672181> (дата обращения: 20.04.2026).
11. Lunardi P., Barla G. Full-face Excavation in Difficult Ground // Journal of Geomechanik und Tunnelbau. 2014. Vol. 7, no. 5. Pp. 461–468. DOI: 10.1002/geot.201400037. URL: https://www.researchgate.net/publication/266378833_Full_face_excavation_in_difficult_ground (дата обращения: 20.04.2026).
12. СП 396.1325800.2018. Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования, утв. приказом Минстроя России от 01.08.2018 № 474/пр (ред. от 26.12.2024).

Дата поступления: 01.03.2026

Решение о публикации: 26.04.2026

Контактная информация:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — доктор техн. наук, доцент; kavkazskiy_vn@mail.ru
ЕРМОНИН Евгений Алесеевич — аспирант; eermonin@bk.ru

Comparative Analysis of Methods for Assessing Initial Displacements of the Near-Face Area in Conditions of Low-Strength Semi-Rocky Soils

V. N. Kavkazskij, E. A. Ermonin

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

For citation: *Kavkazskij V.N., Ermonin E.A. Comparative Analysis of Methods for Assessing Initial Displacements of the Near-Face Area in Conditions of Low-Strength Semi-Rocky Soils // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 402–416. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-402-416 (In Russian)*

Abstract

This article presents a comparative analysis and development of a methodology for accounting for the spatial pattern of rock deformation in the near-face region in a 2D tunnel calculation model, taking into account the technological features of specific engineering and geological conditions. **Research Object:** the stress-strain state of the “soil mass-working-lining” system. **Research Subject:** the magnitude of near-face displacements occurring before the installation of the tunnel lining. **Objective:** the purpose of this study is to determine, based on a comparative analysis of existing methods and 3D numerical modeling, the proportion of initial displacements of the working contour before the installation of lining for tunnels constructed using mining methods in soft semi-rocky soils and to develop practical recommendations for accounting for this displacement in simplified 2D calculation models. **Methods:** to achieve this goal, a combination of methods was used, including a theoretical analysis of existing empirical and analytical approaches, verified through 3D finite element modeling, taking into account the full construction phases and nonlinear soil behavior (the Hooke-Brown and Hardening Soil models) on a real-world project—a tunnel in Sochi. This was followed by a comparative quantitative analysis of the results and the synthesis of a methodology for two-dimensional calculation models. **Results:** based on 3D numerical modeling of tunnel excavation, it was established that, in the soft, semi-rocky soils of Sochi, the initial displacements of the tunnel contour before the installation of the support structure account for 40% of the final total displacements, which differs significantly from estimates obtained using existing empirical formulas (22–60%). This result was verified on a real site and formed the basis for a practical methodology for accounting for spatial deformation in two-dimensional calculation models (analogous to the β -method), while identifying significant gaps in regulatory approaches to assessing overburden pressure. **Practical Significance:** the obtained results enable the implementation of a validated methodology (analogous to the β -method) in design practice for transitioning from resource-intensive 3D modeling to simplified 2D calculations that take into account the real-world interactions between rock mass and support structures, directly impacting the safety, cost-effectiveness, and reliability of tunnel design solutions in complex engineering and geological conditions.

Keywords: rock pressure, road tunnel, mining method of tunnel construction, 3D deformation, longitudinal displacement profile, convergence, β -method

References

1. Bulychev N.S., Fotieva N.N. *Proektirovanie i raschet krep'i kapital'nykh vyrabotok* [Design and Calculation of Support for Capital Workings]. Moscow: Nedra Publishers, 1986, 288 p. (In Russian)
2. Hoek E.C., et al. Kersten Lecture: Integration of Geotechnical and Structural Design in Tunnelling. In Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis, 29 February 2008, pp. 1–53. URL: <https://www.d.umn.edu/~hoek/>

- edu/~carranza/KL08/%5B2008%5D_EH_et_al_%5BKersten-UofM-conference%5D.pdf (accessed: April 20, 2026).
3. Vlachopoulos N., Diederichs M.S. Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, no. 42, pp. 131–146. DOI: 10.1007/s00603-009-0176-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/226038756_Improved_Longitudinal_Displacement_Profiles_for_Convergence_Confinement_Analysis_of_Deep_Tunnel (accessed: April 12, 2026).
4. Bulychev N. S. Mekhanika podzemnykh sooruzhenij [Mechanics of Underground Structures], Textbook for Universities, 2nd ed., revised and expanded, Moscow: Nedra Publishers, 1994, 382 p. (In Russian)
5. Frolov Yu. S., Ivanov T.V. Mekhanika podzemnykh sooruzhenij [Mechanics of Underground Structures: A Textbook], Saint Petersburg, PGUPS, 1997, 102 p. (In Russian)
6. Brinkgreve R.B. J. Ground Response Analysis in PLAXIS 2D, Delft, Plaxis BV, 2015.
7. Hoek E., Brown E.T. Practical Estimates of Rock Mass Strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, no. 34, pp. 1165–1186. URL: [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X) (accessed: April 20, 2026).
8. Kavkazskij V.N., Ermonin E.A., Andreeva L.A. Analiz avarijnykh situatsij pri sooruzhenii avtodorozhnykh tonnelej gornym sposobom v inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh g. Sochi [Analysis of Emergency Situations During the Construction of Road Tunnels by Mining Methods in the Engineering-Geological Conditions of the Town of Sochi], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University], 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 947–957. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-947-957 (In Russian)
9. Strojproekt. Tri desyatletiya. 1990–2020. [Stroyproekt. Three decades. 1990–2020]. URL: <https://www.stpr.ru/upload/iblock/020/zcmb98m54647mljd1j1pbdyk7vnu2hu/%D0%9A%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0%20%D0%BA%2030-%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%8E.pdf> (accessed: April 20, 2026). (In Russian)
10. FKU Upordor “Chernomor’e” [Federal State Institution “Chernomor’e Federal Highway Administration of the Federal Road Agency”], URL: <https://chnm.rosavtdor.gov.ru/department/press-center/novosti/672181> (accessed: April 20, 2026). (In Russian)
11. Lunardi P., Barla G. Full-face Excavation in Difficult Ground. *Journal of Geomechanik und Tunnelbau*, 2014, vol. 7, no. 5, pp. 461–468. DOI: 10.1002/geot.201400037. URL: https://www.researchgate.net/publication/266378833_Full_face_excavation_in_difficult_ground (accessed: April 20, 2026).
12. SP 396.1325800.2018. Ulitsy i dorogi naselennykh punktov. Pravila gradostroitel’nogo proektirovaniya [Streets and Roads of Settlements. Regulation of Urban Planning], approved by the order of the Ministry of Construction of Russia, August 01, 2018. (In Russian)

Received: March 01, 2026

Accepted: April 26, 2026

Author’s information:

Vladimir N. KAVKAZSKIY — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; kavkazskiy_vn@mail.ru
Evgeniy A. ERMONIN — Postgraduate Student; eermonin@bk.ru

УДК 624.074.5

Выбор оптимального значения цилиндрических элементов башенных сооружений

Веремеев Д. В., Пегин П. А.

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

Для цитирования: Веремеев Д. В., Пегин П. А. Выбор оптимального значения цилиндрических элементов башенных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 417–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-417-426

Аннотация

Цель: выявление наиболее рациональных типов сечений с цилиндрической формой поверхности в соответствии с критерием минимизации ветрового воздействия на элемент посредством исследования графика аэродинамических коэффициентов для элементов данного типа сечения, представленного в действующей нормативной документации, и с учетом принятых параметров шероховатости поверхности, значения ветрового давления, а также набора высот относительно поверхности земли. Применение результатов исследований к существующим типам сечений с цилиндрической поверхностью, выполняемых по ГОСТ. **Методы:** анализ существующей научно-технической литературы, затрагивающей вопрос экспериментальных исследований аэродинамических показателей сечений цилиндрической формы. Рассмотрение аналитических выражений вычисления ветрового воздействия на сечения цилиндрической формы с их последующим преобразованием для получения промежуточных значений. Проведение аппроксимации кривой графика значений аэродинамических коэффициентов. **Результаты:** разработан метод выявления диапазонов диаметров сечений цилиндрической формы поверхности, расположенных в критической области чисел Рейнольдса. Получена формула определения аэродинамического коэффициента критической области чисел Рейнольдса путем аппроксимации кривой графика аэродинамических коэффициентов, расположенных на границе критической и закритической области чисел Рейнольдса. Выявлена разница между значениями ветрового воздействия на различные диаметры труб, получен финальный график, иллюстрирующий снижение ветрового воздействия на трубы большего диаметра и разницу со значениями ветрового воздействия на трубы меньшего диаметра, которая может достигать 16%. **Практическая значимость:** возможность использования выведенного метода для получения наиболее рациональных сечений с цилиндрической формой поверхности по параметру наименьшего ветрового воздействия на элемент с учетом принятых значений шероховатости поверхности и ветрового давления, а также набора высот относительно поверхности земли. Метод позволяет разрабатывать более рациональные и экономичные решетчатые конструкции башенных сооружений благодаря снижению ветрового воздействия на отдельные элементы.

Ключевые слова: башня, круглый элемент, цилиндрическое сечение, ветровое воздействие, аэродинамический коэффициент, оптимальные сечения труб, нагрузка, элементы решетки, число Рейнольдса

Различные строительные конструкции, различных типов высотных сооружений [1]. здания и сооружения, находящиеся на открытом пространстве, постоянно подвергаются Ветровое воздействие является динамическим и во многом случайным по своей природе. Математическое описание ветрового воздействия является особо формообразующим для действия достаточно логично разделяется на

статическую и пульсационную составляющие ветровой нагрузки, которые приводят к детерминированному процессу с целью определения его требуемого значения [2]. Подход к определению динамической реакции конструкции (пульсационной составляющей) на ветровое воздействие основан на предположениях, вероятно, введенных А. Давенпортом [3]. Процесс инженерного расчета такого воздействия с учетом статической и пульсационной составляющих представлен в действующих нормах СП 20.13330.2016 [4].

Несмотря на то что принципиально подходы к расчету ветрового воздействия, представленные в нормативных документах различных стран, похожи, присутствуют некоторые аспекты, которые могут привести к существенным отличиям в результатах. К таким расчетным составляющим можно отнести:

- интервалы осреднения скорости ветра;
- закон изменения скорости ветра по высоте [5];
- коэффициенты, учитывающие дополнительные факторы и различные особенности, например, такие как рельеф, сечения и профили зданий [6].

Одним из важных компонентов статической составляющей ветровой нагрузки являются аэродинамические коэффициенты. Они зависят от ряда факторов, например, шероховатости, числа Рейнольдса и геометрических параметров рассматриваемого объекта. При этом значения аэродинамических коэффициентов для различных форм и типов поверхностей элементов получают как обдувами натуральных моделей в аэродинамических трубах, так и различными численными методами Computational fluid dynamics (CFD) [7, 8, 9].

В случае ветрового воздействия на стальные решетчатые башни данный тип нагрузки часто является определяющим при расчете на-

пряженно-деформированного состояния (НДС) данных сооружений. Это можно наблюдать в исследованиях [10–13], где представлено моделирование некоторых случаев ветровых воздействий на башенные сооружения. В связи с этим получение наименьших значений аэродинамических коэффициентов может являться одним из факторов оптимизации конструктивных решений по критерию металлоемкости, что было положено в основу разработки башен так называемого обтекаемого типа [14], что является одним из методов нетрадиционной оптимизации [15]. Наиболее оптимальным сечением решетчатых конструкций с точки зрения аэродинамики является форма цилиндрической поверхности, которая получила большое распространение в виде сортового круглого проката и труб. Они обладают особенностью нелинейной изменчивости аэродинамического коэффициента, зависящего от ряда факторов [16].

Расчеты элементов, выполненных из труб и входящих, например, в состав отдельно стоящей плоской решетчатой конструкции (ОСПРК), которая при этом подвергается ветровому воздействию, показывают, что подбираемые сечения труб, имеющие схожие прочностные характеристики, обладают значительно отличающимися показателями значений аэродинамических коэффициентов. Это оказывает большое влияние на статическую составляющую ветровой нагрузки (w_m) и на конструкцию в целом:

$$w_m = w_0 k(z_e) c, \quad (1)$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления;

$k(z_e)$ — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z_e , принимаемый в соответствии с табл. 11.2 СП 20.13330.2016 [4];

c — аэродинамический коэффициент, вычисляемый по формуле:

$$c = c_x = \frac{1}{A_k} \sum c_{xi} A_i, \quad (2)$$

где A_k — площадь, ограниченная контуром конструкции;

A_i — площадь проекции i -го элемента конструкции;

c_{xi} — аэродинамический коэффициент для элементов круглого сечения, входящих в состав ОСПРК, вычисляемый по формуле:

$$c_{xi} = k_\lambda c_{xoo}, \quad (3)$$

где $k_\lambda = 1$;

c_{xoo} — значение принимается в соответствии с рис. В.17 СП 20.13330.2016 [4] в зависимости от числа Рейнольдса (Re), определяемого по формуле 4, и от относительной шероховатости (δ), определяемой по формуле 5:

$$Re = 0,88d \sqrt{w_0 k(z_e) \gamma_f} \cdot 10^5, \quad (4)$$

где d — диаметр трубы, м;

γ_f — коэффициент надежности по нагрузке;

$$\delta = \Delta / d, \quad (5)$$

где Δ — шероховатость поверхности трубы в зависимости от обработки и материала.

Соответственно, было проведено аналитическое исследование отечественной научно-технической литературы, в результате которого выявлено отсутствие критериев оптимального выбора наиболее эффективных сечений труб с пониженным ветровым воздействием. При этом в литературе была указана область, называемая критической, при числе Рейнольдса, равном от $1,8 \cdot 10^5$ до $3,5 \cdot 10^5$, в которой происходит падение значения аэродинамического коэффициента. Исходя из этого, отмечается, что при выборе труб в критической области

чисел Рейнольдса ветровое давление на цилиндр большего диаметра может быть меньше, чем на цилиндр меньшего диаметра [16].

Для подтверждения данной гипотезы, зададимся набором начальных параметров. Примем трубы по ГОСТ 10704-91 [17] в диапазоне диаметров от 20 до 377 мм со значением шероховатости поверхности элементов как для распыленной краски ($\Delta = 2 \cdot 10^{-5}$ м) и внешним ветровым давлением $w_0 = 0,38$ кПа местности типа А.

При анализе актуального графика значений ветровых сопротивлений для элементов круглого сечения, основанного на действующей нормативной документации и представленного в прил. В СП 20.13330.2016 (рис. В.17) [4], было выявлено некоторое изменение диапазона значений критических чисел Рейнольдса, границы которого составляют от $1,2 \cdot 10^5$ до $2,5 \cdot 10^5$, что представлено в виде штриховой линии на рис. 1, также штрихпунктирными линиями отмечены промежуточные и крайние значения чисел Рейнольдса критической области.

Вычислим граничные и промежуточные значения диаметров труб в критической области чисел Рейнольдса по формуле 5, где значение $\Delta = 2 \cdot 10^{-5}$ м (принято ранее), а значение δ определяется по рис. В.17 прил. В СП 20.13330.2016 [4]. Аналогично, исходя из графика, определим граничные и промежуточные значения чисел Рейнольдса, находящихся в критической области. Все полученные данные сведем в табл. 1 для последующего анализа.

ТАБЛИЦА 1. Диапазоны диаметров труб и чисел Рейнольдса в принятых границах относительных шероховатостей

Δ/d	0,05	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
d , мм	0,4	2,0	20,0	200,0	2000,0
Re	$1,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$

Откорректируем в соответствии с данной таблицей график, представленный на рис. В.17 прил. В СП 20.13330.2016, получим рис. 1.

Для ускорения процесса вычисления значений $c_{x,\infty}$ для критических областей чисел Рейнольдса, представленных на рис. 1, была произведена аппроксимация кривой, обозначенной на графике штриховой линией, функция которой представлена формулой 6:

$$c_{x,\infty} = e^{10,90 + \frac{85247,33}{Re^*} - 0,98 \cdot \ln(Re^*)}, \quad (6)$$

где Re^* — число Рейнольдса критической области.

Вычислим диаметры труб исходя из принятых начальных параметров ветрового давления и типа местности, представленных в табл. 1 чисел Рейнольдса, а также высот z_e , находящихся в диапазоне от 5 до 100 м. Для этого, выразив d по формуле 4, получим формулу 7:

$$d = \frac{Re}{0,88 \sqrt{w_0 k(z_e) \gamma_f} \cdot 10^5}. \quad (7)$$

Вычисленные значения диаметров труб представлены на рис. 2.

Произведем сверку данных графика, представленного на рис. 2, с граничными значениями диаметров труб и чисел Рейнольдса из табл. 1. Можно заметить, что все определенные сечения находятся в границах диаметров от 0,4 до 200 мм. Однако диаметры, получаемые при числе Рейнольдса, равном $2,5 \cdot 10^5$, не соответствуют заданным в табл. 1 граничным значениям. Соответственно, данные диаметры подлежат удалению, а график приобретает вид, представленный на рис. 3.

Применяя полученные ограничения для труб, выполняемых по ГОСТ 10704-91 [17], можно отметить, что соответствующий допустимый к использованию диапазон диаметров труб принимается равным от 42 до 114 мм.

На рис. 1 штриховой и сплошными линиями, которые соответствуют граничным значениям диапазонов диаметров труб, обозначены кривые перехода критической области чисел Рейнольдса в закритическую, что отражено на рис. 4. Исходя из этого, значения аэродинамических коэффициентов труб диаметров, отличных от граничных значений диапазонов и при этом принадлежащих им, вычисляются

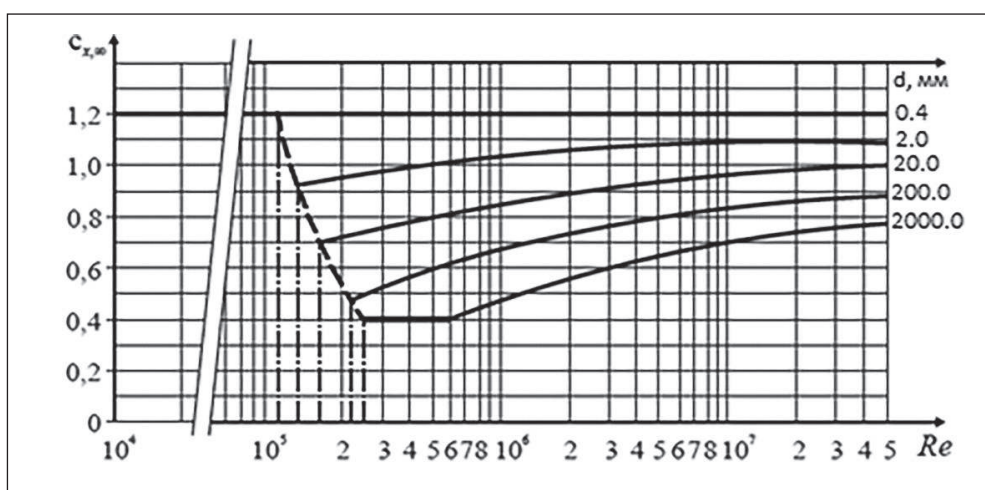


Рис. 1. Зависимость аэродинамического коэффициента трубы $c_{x,\infty}$ от числа Рейнольдса (Re) и d при шероховатости поверхности сечения $\Delta = 2 \cdot 10^{-5}$ м

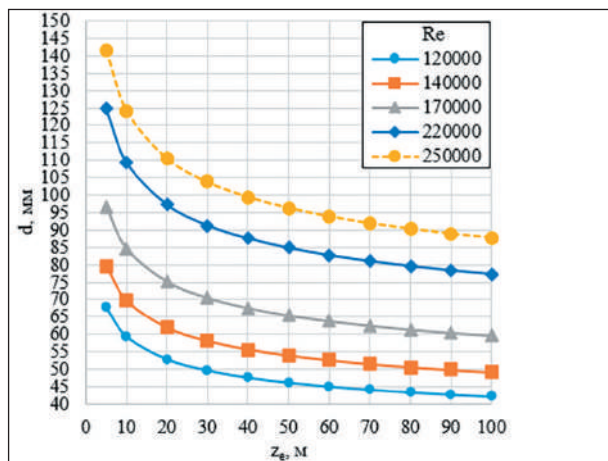


Рис. 2. Диаметры труб, удовлетворяющие числам Рейнольдса критической области

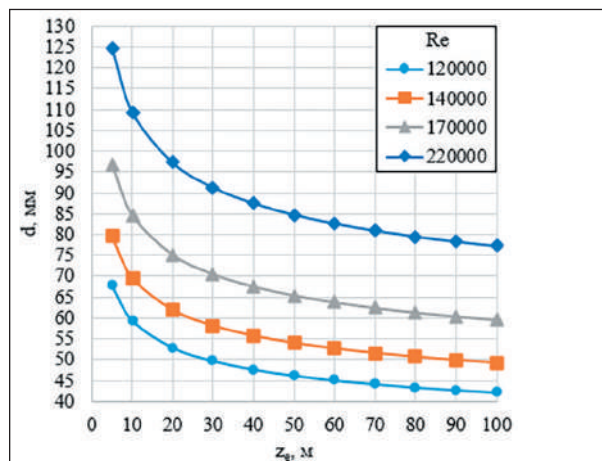


Рис. 3. Откорректированные допустимые диаметры труб, удовлетворяющие числам Рейнольдса критической области

линейной интерполяцией и располагаются в закритической области.

Приведем пример такого вычисления. Рассмотрим трубы диаметром 63,5 и 89 мм, для которых вычислим значения чисел Рейнольдса по формуле 4 для высот z_e в диапазоне от 5 до 100 м с принятыми ранее данными ветрового давления и типа местности. Полученные значения представлены в табл. 2. С целью более наглядного процесса определения значений $c_{x\infty}$ для выведенных данных локализуем представленный на рис. 1 график и получим рис. 5.

При дальнейшем анализе замечаем, что при значениях чисел Рейнольдса в диапазоне от точки А до точки Б, который соответствует границам кривой перехода для диаметров труб от 20 до 200 мм, значение аэродинами-

ческого коэффициента попадает в закритическую область чисел Рейнольдса. Из полученного графика можно определить точку перехода значения аэродинамических коэффициентов из критической в закритическую область. Значение числа Рейнольдса в этой точке составляет $1,7 \cdot 10^5$, что является верхней границей критической области для данного диапазона труб.

Применим полученные данные при вычислении значений чисел Рейнольдса для принятых ранее диапазона труб по ГОСТ 10704-91 [17] и прочих характеристик. Для критической области чисел Рейнольдса в выявленных выше границах от $1,2 \cdot 10^5$ до $1,7 \cdot 10^5$ получим представленный на рис. 6 график. Отметим, что трубы диаметром 102, 108 и 114 мм

ТАБЛИЦА 2. Значения чисел Рейнольдса

z_e	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Re при d , мм	63,5	$1,23 \cdot 10^5$	$1,42 \cdot 10^5$	$1,58 \cdot 10^5$	$1,68 \cdot 10^5$	$1,75 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^5$	$1,90 \cdot 10^5$	$1,94 \cdot 10^5$	$1,98 \cdot 10^5$	$2,01 \cdot 10^5$
	89	$1,56 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^5$	$2,00 \cdot 10^5$	$2,13 \cdot 10^5$	$2,22 \cdot 10^5$	$2,30 \cdot 10^5$	$2,36 \cdot 10^5$	$2,42 \cdot 10^5$	$2,47 \cdot 10^5$	$2,51 \cdot 10^5$	$2,55 \cdot 10^5$

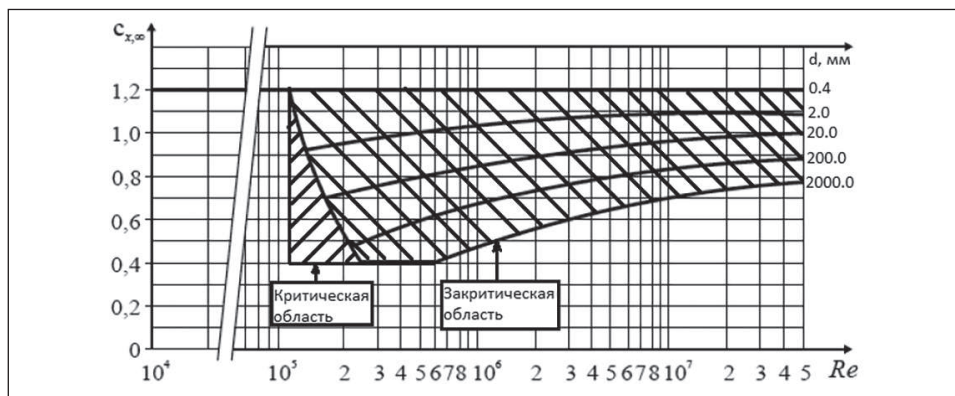


Рис. 4. Области чисел Рейнольдса для диаметров труб

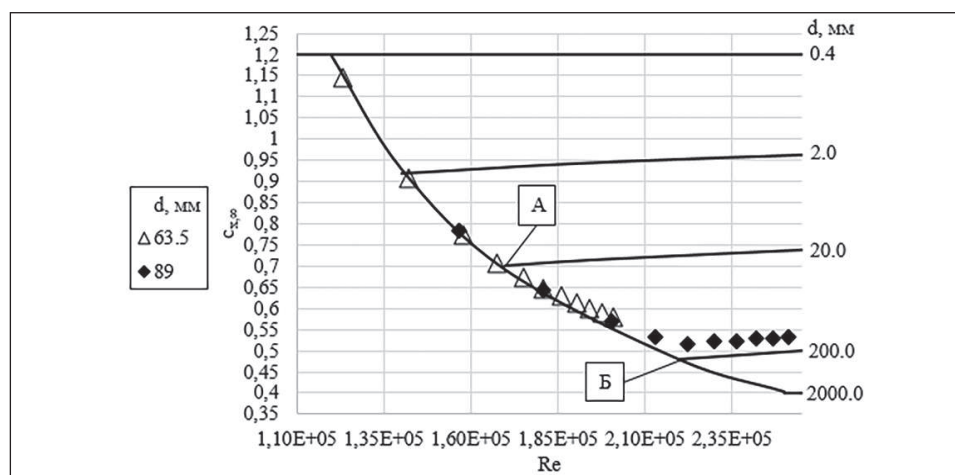


Рис. 5. Получение значений аэродинамических для труб диаметром 63,5 и 89 мм

не попали на рис. 6, так как значения чисел Рейнольдса данных сечений на минимальной отметке в 5 м превышают границы принятой области.

Воспользуемся полученными значениями чисел Рейнольдса (Re^*) для определения значений аэродинамического коэффициента $c_{x∞}$, представленного на графике рис. В.17 прил. В СП 20.13330.2016 [4] и вычисляемого по формуле 6.

Далее вычислим значения ветрового давления на элементы единичной длины (1 м) преобразованием формулы 1 и получим формулу 8:

$$w_m = w_0 k(z_e) c_{x∞} A_i, \quad (8)$$

где A_i — площадь проекции трубы единичной длины.

Выведем полученные значения на рис. 7.

Исходя из графика, можно заметить значительную разницу ветрового давления на трубы единичной длины в зависимости от диаметра. Так, например, разница значений статической составляющей ветрового воздействия на отметке 90 м между трубами диаметром 43 и 60 мм при нагрузке 0,037 кН и 0,031 кН соответственно составляет 16%. Полученное значение разницы может являться основанием для принятия более оптимального типа сечения с точки зрения ветрового давления, что позволит значительно снизить его воздействие

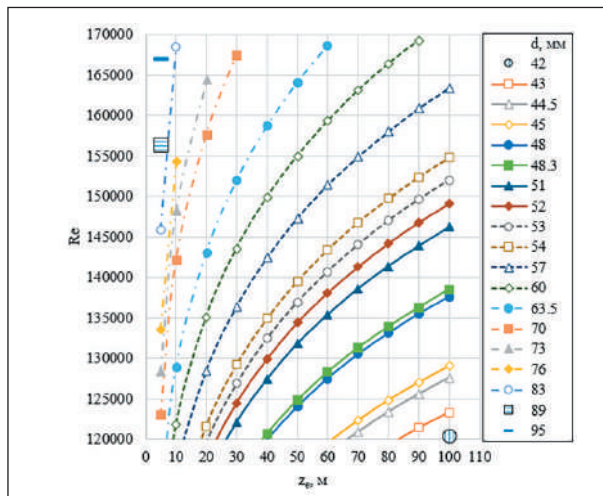


Рис. 6. График значений чисел Рейнольдса для диаметров труб в зависимости от высоты z_e и иных принятых ранее постоянных

на решетчатые конструкции и привести к значительному экономическому эффекту.

По итогам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Был проведен анализ отечественной научной-технической литературы по вопросу оптимизации элементов труб при ветровом давлении, в результате которого было выявлено отсутствие методов определения диапазона диаметров труб и конкретного эффекта от использования труб большего диаметра в диапазоне чисел Рейнольдса критической области.
2. Разработан авторский метод определения диапазона диаметра труб в числах Рейнольдса критической области.
3. Получена формула определения аэродинамического коэффициента критической области чисел Рейнольдса посредством аппроксимации графика зависимости аэродинамического коэффициента от числа Рейнольдса и относительной шероховатости.
4. Определена разница между значениями ветрового воздействия на элементы труб различного диаметра, работающих в области критических

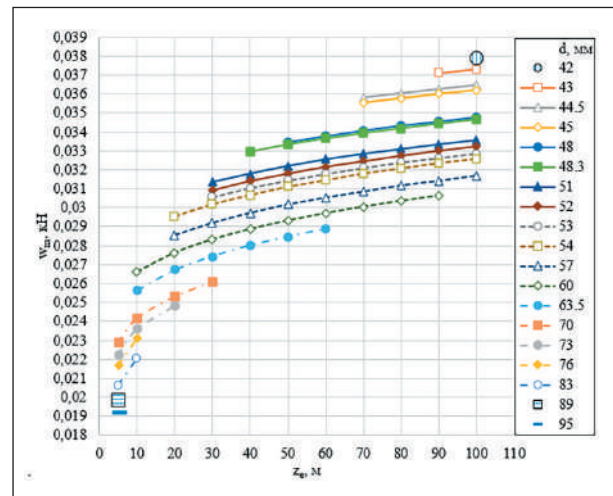


Рис. 7. Значение статической составляющей ветровой нагрузки w_m на трубу единичной длины в зависимости от высоты z_e

значений чисел Рейнольдса. Выявлено снижение величины ветрового воздействия на трубы большего диаметра и различие в воздействии на трубы меньшего диаметра, которое достигает 16 %.

Список источников

1. Topology Optimisation of Lattice Telecommunication Tower and Performance-Based Design Considering Wind and Ice Loads / K. D. Tsavdaridis [et al.] // Structures. 2020. Vol. 27. Pp. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010
2. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 2000. 45 с.
3. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев [и др.]; под общ. ред. А. В. Перельмутера. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2014. 588 с.
4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с изм. № 1–6); утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 03.12.2016 № 891/пр (с изм. и доп.).

5. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б. Е. Масловой, А. В. Швецово́й. М.: Стройиздат, 1984. 358 с.
6. Пичугин С. Ф., Махинько А. В. Нормирование ветровой нагрузки на решетчатые опоры в стандартах разных стран мира // *Металлические конструкции*. 2009. Т. 15, № 4. С. 237–252.
7. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS / С. А. Исаев [и др.] // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 1 (36). С. 103–109. DOI: 10.5862/MCE.36.13.
8. Гостеев Ю. А., Обуховский А. Д., Саленко С. Д. Численное моделирование поперечного обтекания пролетных строений балочных мостов // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2018. Т. 18, № 4. С. 362–378. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378
9. Wind Tunnel Testing of Telecommunication Lattice Towers Equipped With Ancillaries / I. Calotescu [et al.] // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 241. P. 112526. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112526
10. Research on Wind Load Characteristics on the Surface of a Towering Precast Television Tower with a Grid Structure Based on Large Eddy Simulation / P. Wu, G. Chen, R. Feng, F. He // *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 9. P. 1428. DOI: 10.3390/buildings12091428
11. Reconstruction of Dynamic Wind Forces on a Transmission Steel Lattice Tower Using Aeroelastic Wind Tunnel Test Data / W. Zhang [et al.] // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 275. P. 115167. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115167
12. Estimation of Dynamic Wind Forces on a Steel Lattice Tower Based on Generalized Wind Force Spectra / W. Zhang [et al.] // *Structures*. 2023. Vol. 48. Pp. 1634–1650. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.073
13. Gust Response Factor of a Transmission Tower Under Typhoon / X. Fu [et al.] // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2020. Vol. 21, no. 01. P. 2150001. DOI: 10.1142/S0219455421500012
14. Соколов А. Г. Металлические конструкции антенных устройств. М.: Стройиздат, 1971. 240 с.
15. Перельмутер А. В. Задачи синтеза в теории сооружений (краткий исторический обзор) // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 2 (55). С. 70–106.
16. Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт: статистика и динамика. М.: Связьиздат, 1953. 276 с.
17. ГОСТ 10704–91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент (введ. 01.01.1993). М.: Стандартинформ, 2007. 23 с.

Дата поступления: 26.02.2026

Решение о публикации: 17.04.2026

Контактная информация:

ВЕРЕМЕЕВ Дмитрий Валерьевич — аспирант;
dmitry.veremeev@yandex.ru

ПЕГИН Павел Анатольевич — доктор техн. наук,
профессор; PPavel@gmail.com

Selection of the Optimal Value of Cylindrical Elements in Tower Structures

D. V. Veremeev, P. A. Pegin

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

For citation: Veremeev D. V., Pegin P. A. Selection of the Optimal Value of Cylindrical Elements in Tower Structures // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 417–426. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-417-426 (In Russian)

Abstract

Objective: to identify the most efficient types of cylindrical cross-sections in accordance with the criterion of minimizing the wind effect on an element by studying the graph of aerodynamic coefficients for elements of this cross-section type presented in the current regulatory documentation, taking into account the accepted parameters of surface roughness, wind pressure values, and a set of heights relative to the ground surface. Application of the research results to existing types of cylindrical cross-sections manufactured in accordance with GOST. **Methods:** analysis of the existing scientific and technical literature touching upon the issue of experimental studies of the aerodynamic indicators of cylindrical cross-sections. Consideration of analytical expressions for calculating the wind effect on cylindrical cross-sections with their subsequent transformation to obtain intermediate values. Approximation of the curve of the graph of aerodynamic coefficients. **Results:** a technique has been developed for identifying the ranges of diameters of cylindrical cross-sections located in the critical region of Reynolds numbers. A formula for determining the aerodynamic coefficient in the critical Reynolds number region was obtained by approximating the curve of the graph of aerodynamic coefficients located on the boundary of the critical and postcritical Reynolds number regions. The difference between the wind effects on various pipe diameters was identified, and the resulting graph illustrates a reduction in wind effects on larger-diameter pipes. The difference with wind effects on smaller-diameter pipes can reach 16%. **Practical significance:** the possibility of using the derived method to obtain the most rational sections with a cylindrical surface shape based on the parameter of the least wind impact on the element, taking into account the accepted values of surface roughness and wind pressure, as well as the set of heights relative to the ground surface. The method allows for the development of more rational and cost-effective lattice structures for tower structures by reducing the wind impact on individual elements.

Keywords: tower, round element, cylindrical section, wind effect, aerodynamic coefficient, optimal pipe sections, load, lattice elements, Reynolds number

References

1. Tsavdaridis K. D., et al. Topology Optimisation of Lattice Telecommunication Tower and Performance-Based Design Considering Wind and Ice Loads, *Structures*, 2020, vol. 27, pp. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010
2. Rekomendatsii po utochnennomu dinamicheskomu raschetu zdaniy i sooruzheniy na dejstvie pul'satsionnoj sostavlyayushchej vetrovoj nagruzki [Recommendations for the Refined Dynamic Analysis of Buildings and Structures Subject to the Action of the Pulsation Component of Wind Load] / *Moscow: TsNIISK im. V. A. Kucherenko [V. A. Kucherenko Central Scientific Research Institute for Building Structures]*, 2000, 45 p. (In Russian)
3. Gordeev V. N., et al. Nagruzki i vozdejstviya na zdaniya i sooruzheniya [Loads and Impacts on Buildings and Structures], general editorship by A.V. Perelmuter, 4th edition, revised and enlarged, Moscow, SKAD SOFT Publishing House, 2014. 588 p. (In Russian)
4. SP 20.13330.2016 Nagruzki i vozdejstviya [Loads and Impacts], updated version of SNiP 2.01.07-85* (with Amendments No. 1-6); approved. By order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 3, 2016, no. 891/pr. (In Russian)
5. Simiu E., Scanlan R. Vozdejstvie vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind Impact on Buildings and Structures], trans. from English by B.E. Maslova, A.V. Shvetsova, Moscow, Stroyizdat, 1984, 358 p. (In Russian)
6. Pichugin S.F., Makhin'ko A.V. Normirovanie vetrovoj nagruzki na reshychatye opory v standartakh raznykh stran mira [Standardization of Wind Load on Lattice Supports in Standards Around the World], *Metallicheskie konstruktsii [Metal Structures]*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 237–252. (In Russian)
7. Isaev S.A., et al. Razrabotka i verifikatsiya mnogoblochnykh vychislitel'nykh tekhnologij dlya resheniya nestatsionarnykh zadach stroitel'noj aerodinamiki

vysotnykh zdaniy v ramkakh podkhoda URANS [Development and Verification of Multi-Block Computational Technologies for Solving Non-Stationary Problems of Structural Aerodynamics of High-Rise Buildings within the Framework of the URANS Approach], *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Journal of Civil Engineering]*, 2013, no. 1 (36), pp. 103–109. DOI 10.5862 / MCE.36.13 (In Russian)

8. Gostyev Yu. A., Obukhovskij A. D., Salenko S. D. Chislennoe modelirovanie poperechnogo obtekaniya proletrykh stroenij balochnykh mostov [Numerical Modeling of Transverse Flow Around the Superstructures Of Beam Bridges], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Don State Technical University]*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 362–378. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-4-362-378 (In Russian)

9. Calotescu I., et al. Wind Tunnel Testing of Telecommunication Lattice Towers Equipped with Ancillaries, *Engineering Structures*, 2021, vol. 241, pp. 112–526. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112526

10. Wu P., et al. Research on Wind Load Characteristics on the Surface of a Towering Precast Television Tower with a Grid Structure Based on Large Eddy Simulation, *Buildings*, 2022, vol. 12, no 9, p. 1428. DOI:10.3390/buildings12091428

11. Zhang W., et al. Reconstruction of Dynamic Wind Forces on a Transmission Steel Lattice Tower Using Aeroelastic Wind Tunnel Test Data, *Engineering Structures*, 2023, vol. 275, pp. 115–167. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115167

12. Zhang W., et al. Estimation of Dynamic Wind Forces on a Steel Lattice Tower Based on Generalized

Wind Force Spectra, *Structures*, 2023, vol. 48, pp. 1634–1650. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.073

13. Fu X., et al. Gust Response Factor of a Transmission Tower under Typhoon, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, vol. 21, no 01, p. 2150001. DOI: 10.1142/S0219455421500012

14. Sokolov A.G. Metallicheskie konstruksii antenykh ustrojstv [Metal Structures of Antenna Devices], Moscow, Stroyizdat, 1971, 240 p. (In Russian)

15. Perel'muter A.V. Zadachi sinteza v teorii so- oruzhenij: kratkij istoricheskij obzor) [Synthesis Problems in the Theory of Structures: A Brief Historical Review)], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhi- tekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]*, 2016, no. 2 (55), pp. 70–106. (In Russian)

16. Savitskij G.A. Osnovy rascheta radiomacht: statistika i dinamika [Fundamentals of Radio Mast Calculation: Statics and Dynamics], Moscow, Svyazizdat, 1953, 276 p. (In Russian)

17. GOST 10704–91 Truby stal'nye elektrosvarnyye pryamoshovnyye. Sortament [Straight-Seam Electric-Welded Steel Pipes. Assortment], introduced January 01, 1993, Moscow, Standartinform, 2007, 23 p. (In Russian)

Received: February 26, 2026

Accepted: April 17, 2026

Author's information:

Dmitry V. VEREMEEV — Postgraduate Student;
dmitry.veremeev@yandex.ru

Pavel A. PEGIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor;
PPavel@gmail.com

УДК 624.19.034.5
УДК 69.04

Оценка возможности применения нового способа сооружения подводных городских тоннелей в несвязных илистых грунтах

Я. В. Мельник¹, А. Э. Федоров²

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

² ООО «СК «Мостотрест», Россия, 236006, Калининград, Правая наб., 10

Для цитирования: Мельник Я. В., Федоров А. Э. Оценка возможности применения нового способа сооружения подводных городских тоннелей в несвязных илистых грунтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 427–435. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-427-435

Аннотация

Цель: обосновать возможность применения нового способа сооружения подводных городских тоннелей в несвязных илистых грунтах. Предложенная технология — это сооружение подруслового части подводных городских тоннелей (различного назначения) способом вдавливания секций из заранее подготовленного стартового котлована под дном водотока (на незначительной глубине) без разработки грунта, не имеющее аналогов в отечественном тоннелестроении. Для этого необходимо рассчитать и проанализировать напряженно-деформированное состояние методами численного моделирования системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» и разработать мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности секции по грунту и лобового сопротивления грунта в забое при производстве работ по продавливанию. **Методы:** для достижения поставленной цели в специализированном геотехническом программном комплексе MIDAS GTS NX была построена численная модель грунтового массива, вмещающего всю конструкцию подруслового участка подводного тоннеля: продавливаемые тоннельные секции, экран из труб в основании, фундаменты. **Результаты:** по данным геотехнического расчета, для обеспечения надежности конструкции необходимо применить устройство ростверка свайного фундамента под трубы диаметром 1020 мм, что позволяет уменьшить осадки тоннеля и обеспечить устойчивость в процессе эксплуатации. Разработаны мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобового сопротивления грунта в забое. Предложена конструкция клиновидной ножевой секции в сочетании с металлической опалубкой, которая на этапе строительства выполняет функцию внешней металлической гидроизоляции. **Практическая значимость:** проведенное исследование подтверждает возможность использования предложенного способа для строительства городских подводных тоннелей небольшой длины в несвязных илистых грунтах с обеспечением минимальной глубины заложения тоннеля, что значительно сокращает его длину. Способ может быть рекомендован к практическому использованию после проведения серии исследований на базе испытательной (аналитической) лаборатории и целого ряда натурных испытаний.

Ключевые слова: подводный городской тоннель, слабые илистые грунты, продавливание без разработки грунта, клиновидная конструкция, лобовое сопротивление, основание из труб, свайное основание

Введение

В выпуске №4 этого журнала за 2024 год в статье «Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах»

авторами был разработан новый способ строительства подводных городских тоннелей небольшой длины в сильнодеформируемых, несвязных обводненных илистых грунтах.

Предложенная технология — это сооружение подрусловой части подводных городских тоннелей способом вдавливания секций из заранее подготовленного стартового котлована под дном водотока (на незначительной глубине) без разработки грунта, аналогов которому нами не найдено ни на территории Российской Федерации, ни за рубежом.

Город Калининград, имеющий три административных района, разделен рекой Преголей, что значительно усложняет транспортные связи между ними. Из Московского района города существуют четыре выезда в другие районы. Один из таких выездов — двухпутный двухъярусный мост, который выполняет функции как железнодорожного, так и автодорожного. Из-за больших транспортных потоков в часы пик данное сооружение является местом скопления огромного количества легковых автомобилей, что увеличивает время на выезд и въезд в Московский район, а также не обеспечивает проезд грузовых автомобилей, так как расстояние между проезжей частью и вторым ярусом моста не соответствует действующим нормам. Кроме этого, мост является разводным, в опущенном состоянии подмостовой габарит мал. Пропуск крупных морских судов возможен только после подъема пролетного строения,

из-за чего проезд автомобилей в ночное время невозможен.

В данном пересечении и был запроектирован подводный автодорожный тоннель, который обеспечит бесперебойное движение с повышенной пропускной способностью и возможностью пропуска грузовых автомобилей, поскольку существующий мост является негабаритным сооружением. Обеспечение проезда грузового транспорта влечет за собой разгрузку главных проспектов города, а также уменьшение его количества в центре, что обуславливает улучшение транспортной ситуации в целом.

Учитывая назначение тоннеля (а это при существующих нагрузках на магистральные дороги минимум четыре полосы движения: две в одну сторону и две в другую), поперечное сечение тоннеля, запроектированное в соответствии с заданной категорией автодороги и с учетом всех требований СП 122.1333.2023, представлено на рис. 1. По бокам проектируемой конструкции располагаются сервисные отсеки, которые отделены от транспортной зоны стеной. Лотковая плита секции имеет специальные углубления для расположения в них направляющих труб экрана. Нами были рассмотрены несколько вариантов конструкции лотковой

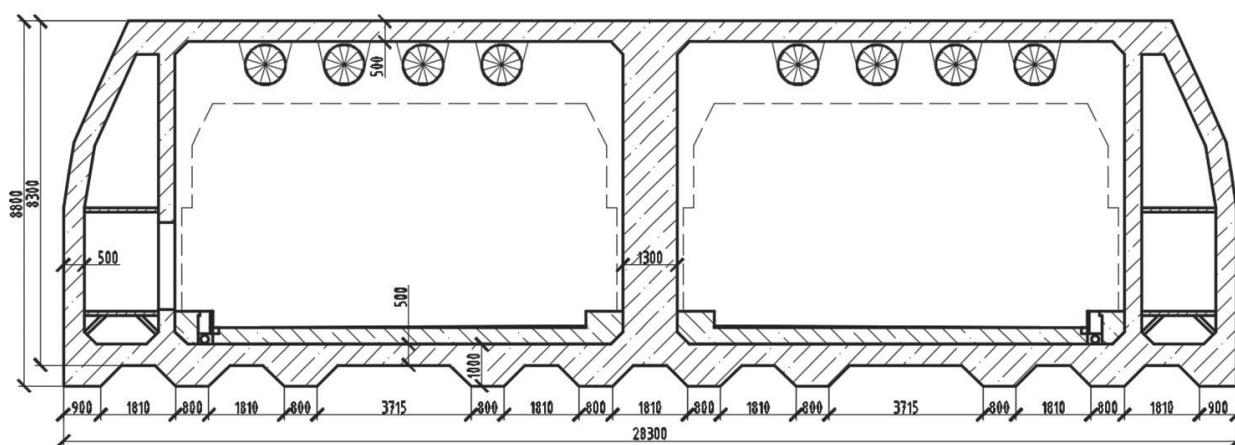


Рис. 1. Проектное поперечное сечение секции

плиты. Мы предлагаем тот, что обеспечивает наиболее стабильное положение. На основе запроектированного поперечного сечения вес секции длиной 53 м составляет более 10 тыс. т, что влечет за собой необходимость проектирования основания для тоннеля, чтобы предотвратить осадку конструкции, так как грунты, на которые опирается тоннель, очень сильно деформируемые. Однако надо отметить, что размеры секции можно изменять в зависимости от назначения, необходимости в сервисных помещениях и длины тоннеля. Общая длина участков тоннеля, которые необходимо продавить, составляет 151 м, учитывая ширину створа в предполагаемом месте строительства.

Обоснование применения разработанного способа требует решения следующих задач:

1. Рассчитать и проанализировать напряженно-деформированное состояние методами численного моделирования системы «грунтовый массив — продавливаемые секции».

2. Разработать мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности секции по грунту и лобового сопротивления грунта в забое при производстве работ по продавливанию.

Расчет параметров, определяющих возможность применения нового способа

Учитывая новизну разработанных решений проходки тоннеля в несвязных илистых грунтах, нами в качестве наиболее значимых параметров, которые влияют на оценку возможности применения данного способа, были выбраны следующие: сопротивление трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобовое сопротивление грунта в забое.

Сопротивление трения наружной поверхности секции по грунту можно определить аналогично способу расчета при продавливании труб по формуле:

$$W_{mp} = \{ [2 \cdot (q \cdot B + p_a \cdot H) + g] \cdot f_0 + (B + H) \cdot c_0 \} \cdot L, \quad (1)$$

где B и H — ширина и высота прямоугольной продавливаемой секции, м;

q — вертикальное, равномерно распределенное давление грунта, кН/м²;

p_a — интенсивность активного горизонтального горного давления грунта, кН/м²;

g — вес одного погонного метра обделки, кН/м;

f_0 — коэффициенты трения окружающего грунта по обделке;

L — длина продавливаемого участка, м;

c_0 — адгезия обделки с окружающим грунтом, кН/м².

Ввиду отсутствия исследований в области продавливания в грунт крупногабаритных конструкций без предварительной разработки грунта считаем возможным производить расчет лобового сопротивления аналогично расчету при проходке методом вдавливания в грунт щитов с закрытой головной частью по формуле:

$$W_{лс} = p_n \cdot A, \quad (2)$$

где p_n — интенсивность пассивного горизонтального горного давления грунта, кН/м²;

A — площадь лобовой части продавливаемой секции, м².

На основе данных формул можно сделать вывод, что форма и размеры поперечного сечения секции будут значительно влиять на лобовое сопротивление и сопротивление трения наружной поверхности. Так как проектируемый тоннель должен соответствовать современным нормам и требованиям, а также обеспечивать необходимую интенсивность движения, в нем должны размещаться минимум четыре полосы движения автомобилей. При таких габаритах оптимальная форма сечения тоннельных

секций — прямоугольная. Разработка наиболее рациональных соотношений размеров и форм секций требует дополнительных исследований.

При анализе формулы 1 можно выделить основной показатель, который будет влиять на сопротивление по боковой поверхности — коэффициент трения окружающего грунта по обделке (f_0).

Коэффициент трения грунта по поверхности секции (бетон — грунт) составляет порядка 0,3. Если обшить бетонную секцию металлическим листом, тем самым уменьшив коэффициент трения до 0,2, а также обеспечив конструкцию внешней металлической гидроизоляцией, то сопротивление уменьшится на 27%.

Так как грунты, в которых будут вестись работы, являются обводненными, содержащими свободную (несвязанную) воду и их средний коэффициент пористости составляет 2,63, то можно сделать вывод, что проектируемый тоннель будет находиться полностью в воде, что уменьшит нормативное давление на грунтовое основание от собственного веса. Кроме того, применение современных специальных растворов и смазок для уменьшения трения грунта по секции также может значительно уменьшать возникающее сопротивление.

Для снижения лобового сопротивления грунта в забое запроектирована конструкция ножевой секции. Она устанавливается в торец первой секции и имеет клиновидную форму (заимствованную у снегоуборочной железнодорожной техники), которая врезается в грунт, тем самым рассекая его. Возможный вид такой конструкции изображен на рис. 2. Кроме того, данная конструкция позволит убирать грунт в стороны во время продавливания, тем самым грунты в забое не будут переуплотняться.

Все вышеизложенные меры по снижению сопротивления по боковой поверхности и лобового сопротивления секций тоннеля позво-

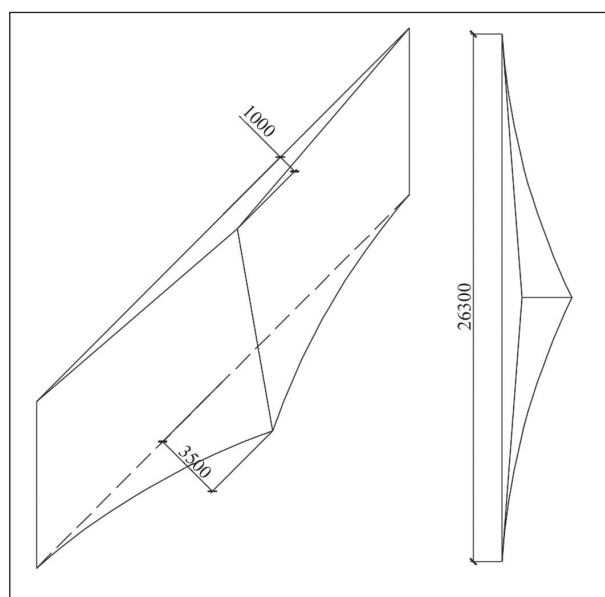


Рис. 2. Клиновидная конструкция для первой секции

ляют нам перейти к следующему этапу исследования.

Для определения необходимого усилия, чтобы вдавить последний участок секции, нужно произвести расчет постоянных нагрузок и рассчитать сопротивление трению и лобовое сопротивление. Расчет постоянных нагрузок будет производиться для трех сечений: в начале участка продавливания, в середине и в конце.

Общее сопротивление продавливанию определяется по формуле:

$$W = W_{\text{тр}} + W_{\text{лс}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{тр}}$ — сопротивление трения наружной поверхности обделки по грунту;

$W_{\text{лс}}$ — лобовое сопротивление продавливанию ножевой секции в грунт.

Постоянные нагрузки, действующие на сооружение, будут определены на весь столб грунта и воды над тоннелем.

Первое и второе расчетные сечения тоннеля взяты по торцам первой и второй секции, третье — по границе приемного котлована.

Для расчета приняты физико-механические характеристики грунтов в месте предполагаемого строительства подводного тоннеля.

Расчеты нагрузок приведены в таблице.

Суммарное сопротивление на всю длину продавливания:

$$W = 143\,384 + 151\,070 + 127\,277 = \\ = 421\,732 \text{ кН} = 42\,990 \text{ т.}$$

Полученное значение сопротивления позволяет нам подобрать различные типы домкратных установок, используемых в строительстве. Это количество может меняться в случае выбора домкратов с различными характеристиками. Они устанавливаются в стартовом котловане на специально подготовленных для этого упорных конструкциях (см. статью «Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах» в выпуске №4 этого журнала за 2024 год).

Проектирование основания под секциями

Так как сооружение тоннеля будет производиться без предварительных работ с грунтом, то в качестве основания был рассмотрен вариант буронабивных свай длиной 30–40 м (длина обусловлена глубиной несущих пород под дном водотока). Данный вариант основания является трудоемким и существенно снизит

скорость и увеличит стоимость строительства, поэтому далее рассмотрен вариант устройства экрана из труб. Учитывая, что грунты, в которых будет вестись продавливание, несвязные и водонасыщенные, а также для контроля секции в пространстве необходимо устройство специальные направляющие из стальных труб, для которых в нижней части секции сделаны специальные углубления. Эти трубы обеспечат устойчивое пространственное положение секции и будут служить в качестве надежного основания, предотвращая осадки конструкции в период эксплуатации. Для стальных труб будет необходимо устройство ростверков, в которые они будут заанкерены, тем самым обеспечивая их проектное положение (рис. 3.1, а). В случае необходимости для данных ростверков можно выполнить собственное основание из забивных или вдавливаемых свай (рис. 3.1, б).

Для расчетного подтверждения возможности применения такого основания был выбран специализированный геотехнический программный комплекс MIDAS GTS NX. Целями расчета в программе являются:

- анализ возможности использования экрана из труб с устройством ростверков, в которые будут заанкерены трубы;
- обоснование устройства собственного свайного основания для ростверков.

ТАБЛИЦА. Расчет нагрузок

	Мощность ила, м	Мощность воды, м	q , кН/м	p , кН/м	$W_{\text{тр}}^0$, кН	$W_{\text{ле}}$, кН	Длина продавливаемого участка	Суммарное сопротивление на участок
1	1,34	4,94	69,57	113,89	2148,9	29 492,7	53	$\frac{143\,384}{(14\,616)}$
2	0,5	6,54	76,56	121,64	2255,4	31 537	53	$\frac{151\,070}{(15\,400)}$
3	6,4	0	74,23	110,47	2190,1	28 723,8	45	$\frac{127\,277}{(12\,974)}$

Примечание. Значения в числителе — в кН, в знаменателе — в т.

Для этого была создана численная модель грунтового массива, который включает в себя три продавливаемые секции (две из них длиной 53 м и одна — 45 м), экран из семи стальных труб в основании секций, а также ростверки, в которые заанкерены трубы [1].

В данном расчете трубы имеют диаметр 1020 мм и толщину стенки 9 мм. Эти показатели и количество труб подбирались серией расчетов, поперечное сечение секций смоделировано в соответствии с рис. 1.

Конечные элементы, моделирующие основные несущие конструкции (класс бетона — В40, марка по морозостойкости — F200, марка по водонепроницаемости — не ниже W12), за-

моделированы элементами Elastic (учитывают упругую работу бетона).

Сваи моделируются одномерными балочными элементами. Взаимодействие свай и грунтового массива моделируется интерфейсными элементами, позволяющими корректно учитывать трение по боковой поверхности, а также отпор под пятой свай. Параметры свайных интерфейсов вычисляются утилитой MIDAS GTS NX «Свайный интерфейс v. 2.0».

Модель конструкции секции, экрана из труб под основанием секции, выполняющего функцию несущего основания, и направляющих для продавливаемых секций, а также свайное основание для фундаментов, в которые будут заанкерены трубы, представлены на рис. 3.2.

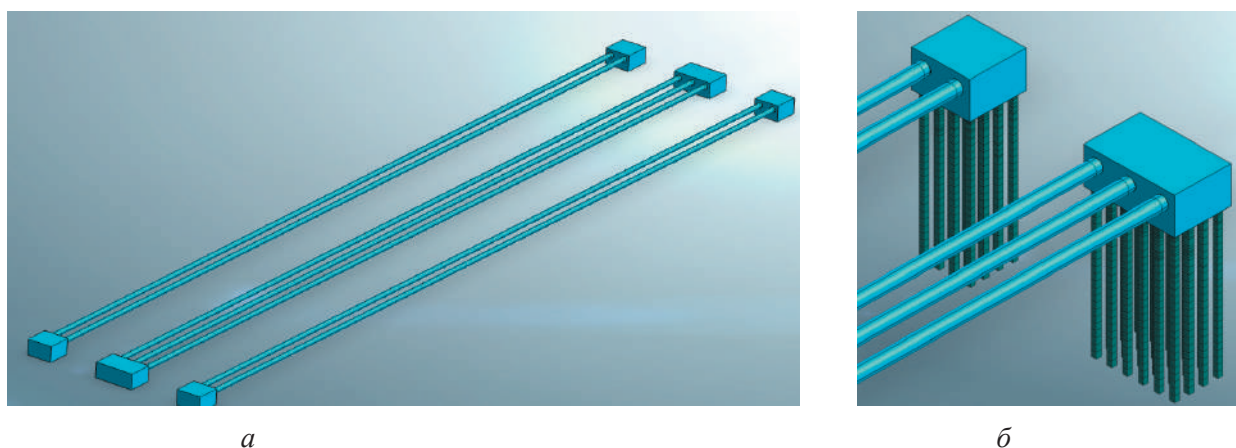


Рис. 3.1. *а* — общий вид основания из труб; *б* — ростверки со свайным основанием

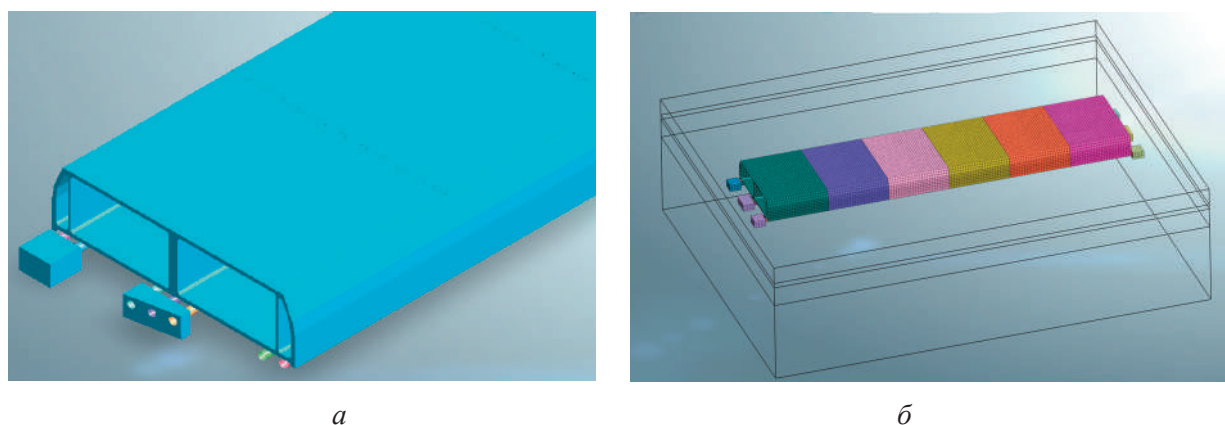


Рис. 3.2. *а* — модель тоннеля в ПК; *б* — общий вид конечно-элементной модели

Выполненный расчет системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» с применением модели Мора — Кулона подтвердил возможность использования труб диаметром 1020 мм при длине 150 м, поскольку максимальные вертикальные перемещения не превысили предельные (рис. 3.3). На стадии оценки дополнительных перемещений ростверков был выполнен расчет модели без учета свайного основания, который показал их возможное опрокидывание во время эксплуатации. Поэтому с целью предотвращения опрокидывания и уменьшения осадок ростверков за проектировано свайное основание под ними (рис. 3.4).

Результаты работы

1. Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» по результатам расчета в специализированной геотехнической программе. Для обеспечения надежности конструкции предусмотрено устройство ростверка со свайным фундаментом под трубы диаметром 1020 мм, что позволяет уменьшить осадки тоннеля и обеспечить устойчивость в процессе эксплуатации. Максимальные значения перемещений направляющих труб (при диаметре 1020 мм) составляют 4,6 см, что ниже допустимого значения 6 см при пролете трубы длиной 150 м.

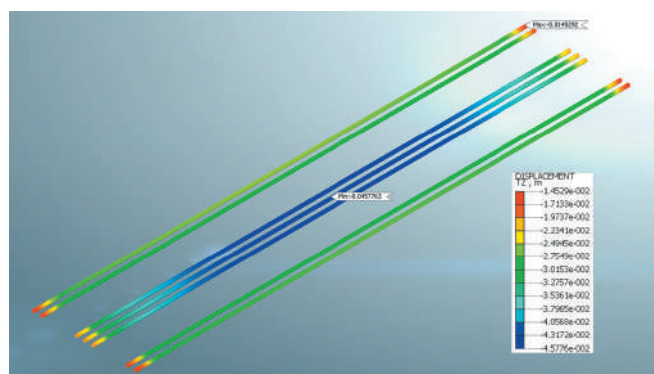


Рис. 3.3. Изополя вертикальных перемещений основания из труб

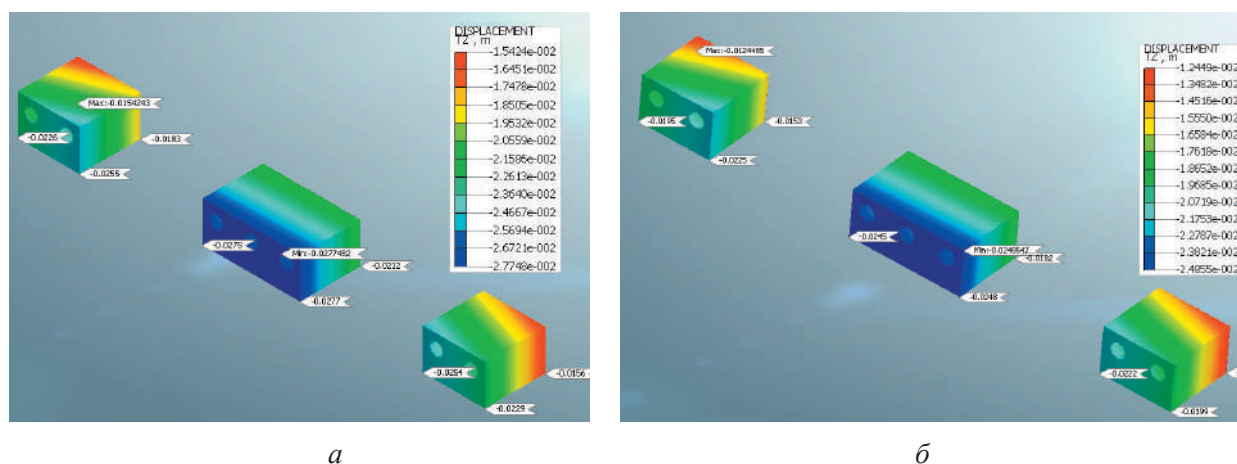


Рис. 3.4. *a* — изополя перемещений с использованием свайного основания;
б — изополя перемещений без использования свайного основания

2. Разработаны мероприятия по снижению сопротивления трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобового сопротивления грунта в забое. Предложена конструкция клиновидной ножевой секции в сочетании с металлической опалубкой, которая на этапе строительства выполняет функцию внешней металлической гидроизоляции. Данная конструкция позволяет снизить сопротивление на 27% при продавливании секций и обеспечивает надежную гидроизоляцию в процессе эксплуатации.

Вывод

Выполненная оценка напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив — продавливаемые секции» по результатам расчета в специализированной геотехнической программе, а также разработанные меры по уменьшению сопротивления трения наружной поверхности продавливаемых секций и лобового сопротивления грунта в забое при продавливании подтвердили возможность применения данного способа. Однако решение о его использовании при строительстве можно принять только после проведения исследований на базе испытательной (аналитической) лаборатории и целого ряда натурных испытаний, требующих значительных материальных, интеллектуальных и временных вложений.

Список источников

1. Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов // Путевой навигатор. 2022. № 50 (76). С. 36–44.
2. Транспортный переход через пролив Невельского — мост или тоннель? / Е. Б. Шестакова [и др.] // Путевой навигатор. 2019. № 39 (65). С. 46–59.
3. Королько С. Н. Технологии и обеспечение безопасности ведения подземных работ при проходке тоннелей на совмещенной дороге Адлер — горно-климатический курорт «Альпика-Сервис» // Метро и тоннели. 2010. № 4. С. 30–33.
4. Курбацкий Е. Н., Сеницын А. С. Конструктивно-технологические решения протяженных переходов через проливы, сложенные слабыми грунтами по дну на территориях расчлененных ландшафтов // Перспективы развития строительного комплекса. 2015. № 1. С. 248–254.

Дата поступления: 11.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

МЕЛЬНИК Яна Владленовна —

кандидат техн. наук, доцент;

melnik-yana@yandex.ru

ФЕДОРОВ Андрей Эдуардович — инженер;

rtut199922@mai.ru

Assessment of the Possibility of Using a New Method for Constructing Underwater Urban Tunnels in Unrelated Silty Soils

Ia. V. Mel'nik¹, A. E. Fiodorov²

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

²SK “Mostotrest” LLC, 10 Pravaya nab., Kaliningrad, 236006, Russia

For citation: *Mel'nik Ia. V., Fiodorov A. E. Assessment of the Possibility of Using a New Method for Constructing Underwater Urban Tunnels in Unrelated Silty Soils // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 427–435. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-427-435 (In Russian)*

Abstract

Objective: to substantiate the possibility of using a new method of constructing underwater urban tunnels in unrelated muddy soils. The proposed technology is the construction of the subsurface of underwater urban tunnels (for various purposes) by pressing sections from a pre-prepared launch pit under the bottom of a watercourse (at an insignificant depth) without excavation, which has no analogues in the domestic tunneling industry. It is necessary to calculate and analyze the stress-strain state using numerical modeling methods of the “soil massive-pressed sections” system and develop measures to reduce the friction resistance of the outer surface of the section on the ground and the frontal resistance of the soil in the face during the production of punching operations. **Methods:** to achieve this goal, a numerical model was built in the specialized geotechnical software complex MIDAS GTS NX a soil massive containing the entire structure of the subsurface section of the underwater tunnel: pressed tunnel sections, a screen of pipes in the base, foundations. **Results:** according to geotechnical calculations, to ensure the reliability of the structure, it is necessary to use a grillage device for a pile foundation for pipes D1020 mm, which reduces tunnel precipitation and ensures stability during operation. Measures have been developed to reduce the friction resistance of the outer surface of the pressed sections and the frontal resistance of the soil in the face. The design of a wedge-shaped knife section in combination with a metal formwork is proposed, which performs the function of external metal waterproofing at the construction stage. **Practical significance:** the conducted research confirms the possibility of using the proposed method for the construction of urban underwater tunnels of short length in unrelated muddy soils with a minimum depth of tunnel laying, which significantly reduces its length and can be recommended for practical use after conducting a series of studies based on a testing (analytical) laboratory and a number of field tests.

Keywords: underwater urban tunnel, weak silty soils, penetration without excavation, wedge-shaped structure, frontal resistance, pipe foundation, pile foundation

References

1. Sokornov A.A., Kon'kov A.N. Modelirovanie prokhodki tonnelya glubokogo zalozheniya v metode konechnykh elementov [Modeling of a Deep Shallow Tunnel Driving in the Finite Element Method], *Putevoj navigator [Travel Navigator]*, 2022, no. 50 (76), pp. 36–44. (In Russian)

2. Shestakova E.B., et al. Transportnyj perekhod cherez proliv Nevel'skogo — most ili tunnel'? [Transport Crossing over the Nevelsky Strait — Bridge or Tunnel?], *Putevoj navigator [Travel Navigator]*, 2019, no. 39 (65), pp. 46–59. (In Russian)

3. Korol'ko S.N. Tekhnologii i obespechenie bezopasnosti vedeniya podzemnykh rabot pri prokhodke tonnelej na sovmeshchennoj doroge Adler — Gornoklimaticheskij kurort “Al'pika-Servis” [Technologies and Safety of Underground Work During Tunneling on the Combined Road Adler — Mountain Climatic Resort Alpika-Service], *Metro i tunneli [Metro and tunnels]*, 2010, no. 4, pp. 30–33. (In Russian)

4. Kurbatskij E.N., Sinitsyn A.S. Konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya protyazhennykh perekhodov cherez prolivy, slozhennye slabymi gruntami po dnu na territoriyakh raschlenennykh landshaftov [Constructive and Technological Solutions for Extended Crossings Through Straits Composed of Weak Soils Along the Bottom in the Territories of Dissected Landscapes], *Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa [Prospects for the Development of the Construction Complex]*, 2015, no. 1, pp. 248–254. (In Russian)

Received: February 11, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Iana V. MEL'NIK — PhD in Engineering, Associate Professor; melnik-yana@yandex.ru
Andrey E. FIODOROV — engineer; rtut199922@mai.ru

УДК 656.259.12

Экспериментальные исследования зависимости тока, протекающего через изолирующий стык, от изменения его сопротивления

В. А. Надежкин, И. С. Бредун

Приволжский государственный университет путей сообщения, Россия, 443066, Самара, ул. Свободы, 2в

Для цитирования: *Надежкин В. А., Бредун И. С.* Экспериментальные исследования зависимости тока, протекающего через изолирующий стык, от изменения его сопротивления // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 436–442. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-436-442

Аннотация

Цель: экспериментальное подтверждение гипотезы о том, что величина сигнального тока, протекающего через изолирующий стык рельсовой цепи, является информативным диагностическим признаком. Исследование направлено на установление количественной зависимости между изменением сопротивления изолирующего стыка и силой тока, что необходимо для создания системы непрерывного мониторинга и прогнозирования предотказного и неисправного состояния изолирующего стыка. **Методы:** проведены натурные измерения на железнодорожном полигоне с использованием индикатора тока рельсовых цепей (ИТРЦ-М). Для обработки экспериментальных данных и получения аналитической зависимости применена полиномиальная аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК). Наилучшее соответствие экспериментальным точкам обеспечила модель в виде полинома третьей степени. **Результаты:** установлена обратно пропорциональная зависимость: с уменьшением сопротивления изолирующего стыка величина сигнального тока, протекающего через него, закономерно возрастает. Получена высокоточная математическая модель (полином третьей степени), достоверно описывающая экспериментальные данные в рабочем диапазоне сопротивлений. Показано, что поведение модели за пределами интервала измерений (асимптотическое стремление к отрицательной бесконечности при уменьшении тока) исключает возможность ложноположительных и ложноотрицательных прогнозов при диагностике, что подтверждает ее надежность. **Практическая значимость:** результаты исследования доказывают принципиальную возможность разработки и внедрения системы технического диагностирования и мониторинга изолирующих стыков (СТДМ-ИС). Использование предложенного диагностического признака (величины сигнального тока) позволит перейти от плановых трудоемких проверок к системе непрерывного автоматизированного контроля. Это повысит безопасность движения за счет раннего обнаружения предотказных и неисправных состояний изолирующих стыков, сократит эксплуатационные расходы и повысит надежность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ).

Ключевые слова: техническая диагностика, мониторинг устройств ЖАТ, предиктивная аналитика, изолирующие стыки, рельсовые цепи, предотказные состояния, сигнальный ток

Введение

Минимизация отказов в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) — это насущная задача, от которой напрямую зависит безопасность перевозок. Про-

цесс анализа сбоев осложняется дефицитом диагностических данных, а также недостаточной точностью измерительного оборудования для оценки дестабилизирующих электромагнитных воздействий.

Ключевым компонентом функционирования рельсовых цепей (РЦ) являются изолирующие стыки, основное назначение которых — обеспечить электрическую независимость смежных РЦ. Преимущественной причиной неисправностей изолирующих стыков является снижение уровня сопротивления изоляции [1]. Снижение уровня сопротивления стыка чаще всего происходит вследствие повреждения торцевой изоляции при температурном расширении рельсов в жаркий период, а также из-за износа боковых прокладок, деформации изолирующих втулок и шайб.

Решающую функцию в своевременном обнаружении признаков приближающегося отказа выполняют средства диагностирования и мониторинга систем ЖАТ. В связи с этим центральной задачей для увеличения эксплуатационного ресурса изолирующих стыков является создание специализированного прибора, предназначенного для постоянного контроля величины их сопротивления.

Материалы и методы

На текущий момент эксплуатируемые РЦ не оснащены системой непрерывного мониторинга состояния изолирующих стыков. Их диагностирование выполняется в плановом порядке с периодичностью раз в шесть месяцев или после проведения путевых работ. Процедура требует обязательного участия как минимум двух работников эксплуатационного персонала, которые с использованием метода «рельс — накладка» производят семь измерений напряжения между элементами стыка и рельсами. На основании анализа разности полученных значений делается вывод о целостности изоляции стыка 1 или 2. Этот процесс крайне трудоемок, особенно когда эксплуатационному персоналу приходится выезжать для регламентных проверок изолирующих стыков на перегон [2].

Известно [3–5], что в случае снижения сопротивления изолирующего стыка создаются цепи прохода сигнального тока в междроссельной перемычке и на концах рельс в створе изолирующего стыка. В данном экспериментальном исследовании было проведено измерение сигнального тока, протекающего через изолирующий стык и междроссельную перемычку на участке с электротягой постоянного тока. Был использован индикатор тока рельсовых цепей, аналогичный прибору ИТРЦ-М, при различных значениях сопротивления на измеряемом и на парном стыке для подтверждения возможности использования значения тока, протекающего через стык и междроссельную перемычку, как информативного признака в системе технического диагностирования и мониторинга изолирующих стыков (СТДМ-ИС) [5].

Для этого был использован специальный уникальный магазин сопротивлений с номиналами от 30,3 до 48,3 Ом, соответствующий зоне, при которой диагностируемый стык располагается в предотказном состоянии [6], и позволяющий наиболее наглядно установить обратно пропорциональную зависимость тока от сопротивления. При расширении диапазона измерений в сторону больших сопротивлений предложенный диагностический признак может быть использован для раннего обнаружения тенденции к отказу.

Характеристики рельсовых цепей, такие как входное и обратное входное сопротивление, а также сопротивление изолирующих стыков и обмоток дроссель-трансформаторов выступают в качестве влияющих факторов. В рамках данного исследования на первом этапе проводились измерения величины тока, протекающего через изолирующий стык, при имитации вариаций его собственного сопротивления с помощью магазина сопротивлений. Этот эксперимент повторялся при уменьшении

сопротивления изолирующего стыка по заранее определенным значениям, при этом парный стык имел максимальное сопротивление.

Для получения аналитической зависимости, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные, была применена полиномиальная аппроксимация. Выбор этого метода обусловлен нелинейным характером зависимости тока от сопротивления, который не может быть с достаточной точностью описан простой линейной моделью, особенно в рабочем диапазоне сопротивлений, где наблюдаются наибольшие изменения тока. Аппроксимация полиномом третьей степени позволяет учесть кривизну экспериментальной зависимости и обеспечивает высокую точность приближения на интервале измерений.

Процесс аппроксимации был выполнен с использованием метода наименьших квадратов (МНК). В результате была выведена формула аппроксимирующей кривой в виде полинома третьей степени:

$$d(R_{st}) = 150,5 - 1031,3x + 3065,1x^2 - 3340,2x^3.$$

На рис. 1 результаты исследований представлены графически: зависимость тока, протекающего через стык, от сопротивления одного из стыков, замеренная на полигоне железной дороги; данные математического моделирования, аппроксимированного полиномом третьего порядка [7, 8].

Физический процесс увеличения тока при снижении сопротивления носит нелинейный характер вследствие влияния входного

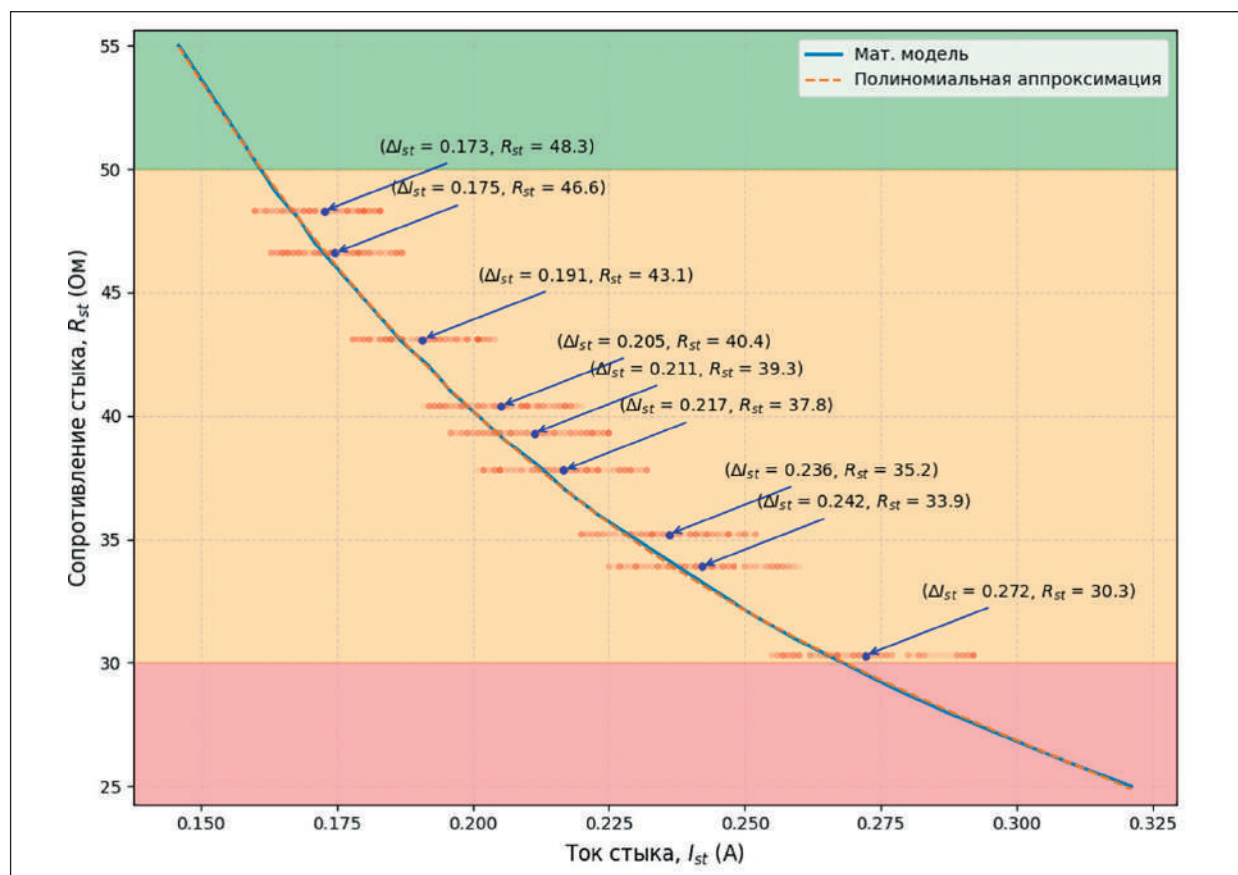


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований в рабочем интервале измерений

сопротивления рельсовой цепи и других факторов.

Важным свойством использованной модели является ее поведение за пределами интервала экспериментальных данных. Поскольку старший коэффициент a , аппроксимирующего полинома третьей степени, является отрицательным, при экстраполяции и значительном уменьшении значений тока (I_{st}) кривая зависимости сопротивления (R_{st}) будет асимптотически стремиться к отрицательной бесконечности [9, 10]. Это указывает на то, что полученная модель защищена от ложноположительных и ложноотрицательных результатов при прогнозировании дальнейшего сопротивления изолирующего стыка.

На втором этапе проводились измерения величины тока, протекающего через междроссельную перемычку, при имитации вариаций сопротивления и уменьшении сопротивления

изолирующего стыка 1 по заранее определенным значениям. При этом парный стык 2 имел максимальное сопротивление.

Применимость диагностической функции с использованием тока в междроссельной перемычке $I_{st} = f(R_{st})$ проверяется реальными данными, полученными измерениями, представленными в виде графика, и сравнением с диагностической функцией [3].

Анализ результатов, представленных на графике (рис. 2), показывает, что величина средней абсолютной ошибки сопоставления экспериментальных измерений с расчетными значениями по предложенной математической модели 12,75% подтверждает применимость тока, протекающего через междроссельную перемычку, как одного из информативных признаков диагностики изолирующих стыков [11, 12].

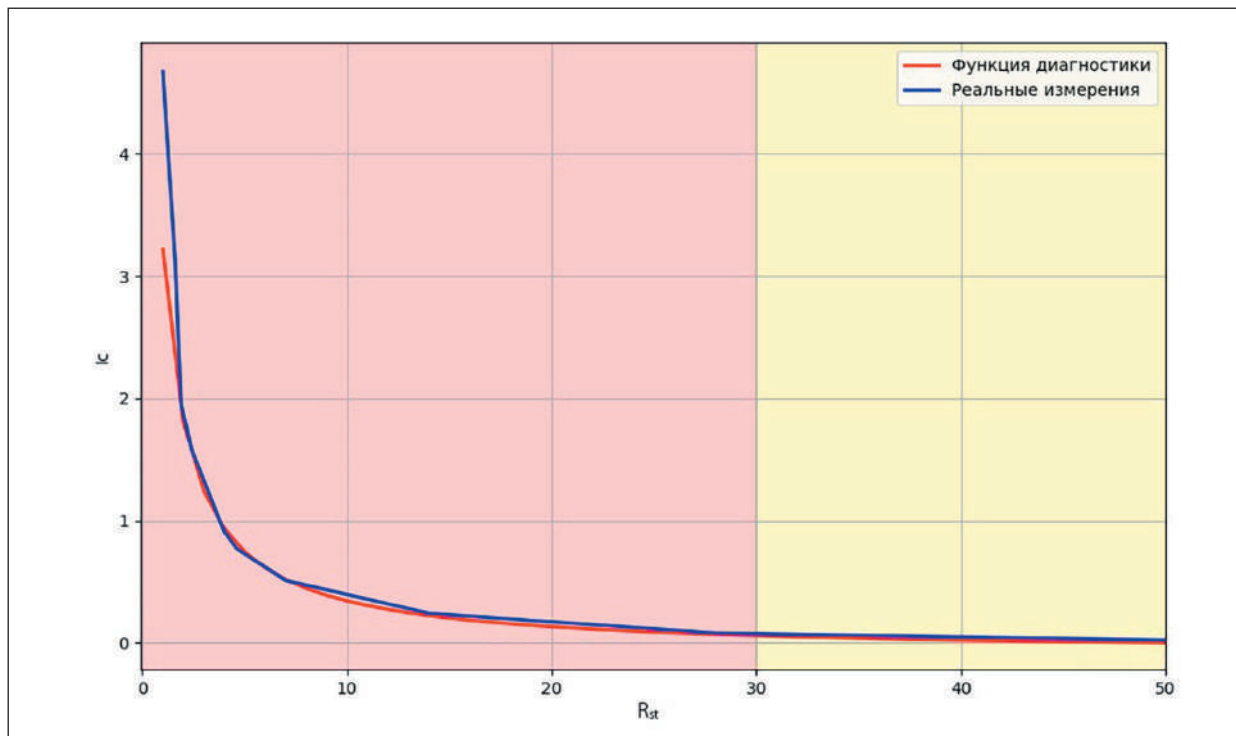


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований на междроссельной перемычке в рабочем интервале измерений

Заключение

Экспериментальным и аналитическим путем была установлена обратно пропорциональная зависимость: с уменьшением сопротивления изолирующих стыков пропорционально возрастает сила сигнального тока, протекающего через них. Достоверное совпадение данных, полученных в ходе натурных экспериментов, с результатами, рассчитанными с помощью математической модели, доказывает принципиальную возможность реализации диагностики. Таким образом, контроль состояния изолирующих стыков может базироваться на диагностических функциях, где в качестве ключевого аргумента выступают значения сигнальных токов, позволяющие фиксировать предотказное и неисправное состояние изолирующего стыка. В дальнейшем при расширении диапазона измерений в сторону больших сопротивлений предложенный диагностический признак может быть использован для раннего обнаружения тенденции к отказу.

Список источников

1. Тарасов Е. М., Надежкин В. А. Анализ отказов и эволюция стратегий организационно-технических мероприятий по обслуживанию изолирующих стыков // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 2 (98). С. 73–78. EDN NLPKZW
2. Перникис Б. Д., Ягудин Р. Ш. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1994. 254 с.
3. Диагностика изолирующих стыков на основе оценки предотказных состояний / Е. М. Тарасов [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2025. № 6. С. 2–4. DOI: 10.62994/AT.2025.6.6.001. EDN UHCQR
4. Разработка математической модели изолирующих стыков в комплексе с дроссель-трансформаторами / Е. М. Тарасов [и др.] // Наука и образование транспорту. 2021. № 1. С. 316–320. EDN DPZVHC

5. Insulating Joints as a Destabilizing Factor in the Operation of the Track Circuit / E. Tarasov [et al.] // VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023), Karshi, June 14–16, 2023. Les Ulis: EDP Sciences, 2023. P. 1019. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101019. EDN YMJDQR

6. Дмитренко И. Е., Устинский А. А., Цыганков В. И. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 312 с.

7. Сепетый А. А., Федорчук А. Е. Технология диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ на уровне дистанций автоматики и телемеханики // Информатизация и связь. 2013. № 2. С. 71–76. EDN RBFTTD

8. Тарасов Е. М., Надежкин В. А. Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. 2024. № 2. С. 45–50. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6. EDN DSUOVV

9. Бредун И. С. Разработка алгоритма оценки состояния изолирующих стыков на основе интеграции априорных данных // Транспортное дело России. 2025. № 2. С. 204–206. EDN VBLTBY

10. Маштаков Н. С., Часов П. С. Предиктивная аналитика: из исторических данных к стратегическому прогнозированию // Оригинальные исследования. 2023. Т. 13, № 12. С. 61–66. EDN LKTDSY

11. Орлов А. Машинное обучение для больших данных // Открытые системы. СУБД. 2016. № 1. С. 26–27. EDN VQCOER

12. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. 171 с. EDN: XAFAIN

Дата поступления: 12.01.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

НАДЕЖКИН Вадим Александрович — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» ПривГУПС; v.nadezhkin@samgups.ru

БРЕДУН Илья Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» ПривГУПС; v.nadezhkin@samgups.ru

Experimental Studies of the Dependence of the Current Flowing Through an Insulating Joint on Changes in Its Resistance

V. A. Nadezhkin, I. S. Bredun

Volga State University of Railway Transport, 2v Svobody st., Samara, 443066, Russia

For citation: *Nadezhkin V.A., Bredun I.S. Experimental Investigation of Insulating Joint Current vs. Resistance // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 436–442. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-436-442 (In Russian)*

Abstract

Objective: experimental verification of the hypothesis that the magnitude of the signal current flowing through an insulating joint of a track circuit is an informative diagnostic indicator. The research aims to establish a quantitative relationship between the change in the insulating joint's resistance and the current strength, which is necessary for creating a system for continuous monitoring and predicting its pre-failure condition. **Methods:** field measurements were conducted on a railway test site using a Track Circuit Current Indicator (ITRC-M). Polynomial approximation using the least squares method (LSM) was applied to process the experimental data and obtain an analytical relationship. The model that provided the best fit to the experimental data was a third-degree polynomial. **Results:** an inverse relationship was established: as the resistance of the insulating joint decreases, the magnitude of the signal current flowing through it systematically increases. A high-precision mathematical model (a third-degree polynomial) was obtained, which reliably describes the experimental data within the operating range of resistances. It is shown that the behavior of the model beyond the measurement interval (asymptotically approaching negative infinity as the current decreases) eliminates the possibility of false-positive and false-negative predictions during diagnostics, confirming its reliability. **Practical significance:** the research results prove the fundamental possibility of developing and implementing a Technical Diagnostic and Monitoring System for Insulating Joints (STDM-IJ). Using the proposed diagnostic indicator (the magnitude of the signal current) will enable a transition from scheduled labor-intensive inspections to a system of continuous automated monitoring. This will improve traffic safety through the early detection of pre-failure conditions of insulating joints, reduce operational costs, and enhance the reliability of railway signaling and interlocking systems.

Keywords: technical diagnostics, monitoring of header devices, predictive analytics, insulating joints, rail circuits, pre-fault conditions, signal current

References

1. Tarasov E.M., Nadezhkin V.A. Analiz otkazov i evolyutsiya strategij organizatsionno-tekhnicheskikh meropriyatij po obsluzhivaniyu izoliruyushchikh stykov [Failure Analysis and Evolution of Strategies for Organizational and Technical Maintenance Measures for Insulating Joints], *Vestnik transporta Povolzh'ya*

[*Volga Transport Bulletin*], no. 2 (98), pp. 73–78. EDN: NLPKZW (In Russian)

2. Pernikis B.D., Yagudin R. Sh. Preduprezhdenie i ustranenie neispravnostej v ustrojstvakh STsB [Prevention and Elimination of Faults in Signaling, Centralization and Blocking Devices], 2nd ed., rev. and suppl. Moscow, Transport, 1994. 254 p. (In Russian)

3. Tarasov E. M., et al. Diagnostika izoliruyushchikh stykov na osnove otsenki predotkaznykh sostoyaniy [Diagnostics of Insulating Joints Based on Assessment of Pre-Failure States], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communication, Informatics]*, 2025 no. 6, pp. 2–4. DOI: 10.62994/AT.2025.6.6.001. EDN: UIICQR (In Russian)
4. Tarasov E. M., et al. Razrabotka matematicheskoy modeli izoliruyushchikh stykov v komplekse s drossel'-transformatorami [Development of a Mathematical Model of Insulating Joints in Combination with Choke Transformers], *Nauka i obrazovanie transportu [Science and Education for Transport]*, 2021, no. 1, pp. 316–320. EDN: DPZVHC (In Russian)
5. Tarasov E. M., et al. Insulating Joints as a Destabilizing Factor in the Operation of the Track Circuit, *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023)*, Karshi, June 14–16, Les Uli, 2023, pp. 01019. EDP Sciences. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101019. EDN: YMJDQR
6. Dmitrenko I. E., Ustinskij A. A., Tsygankov V. I. Izmereniya v ustrojstvakh avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte [Measurements in Automation, Telemechanics and Communication Devices on Railway Transport], Moscow, *Transport*, 1982, 312 p. (In Russian)
7. Sepetyi A. A., Fedorchuk A. E. Tekhnologiya diagnostirovaniya i monitoringa ustrojstv ZhAT na urovne distantsij avtomatiki i telemekhaniki [Technology for Diagnostics and Monitoring of Railway Automation and Telemechanics Devices at the Level of Automation and Telemechanics Distances], *Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and Communication]*, 2013, no. 2, pp. 71–76. EDN: RBFTTD (In Russian)
8. Tarasov E. M., Nadezhkin V. A. Diagnostirovanie v zhiznennom tsikle izoliruyushchikh stykov rel'sovykh tsepej [Diagnostics in the Life Cycle of Insulating Joints of Track Circuits], *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informatsionnyj sbornik [Transport: Science, Technology, Management. Scientific Information Collection]*, 2024, no. 2, pp. 45–50. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-02-6. EDN: DSUOVVB (In Russian)
9. Bredun I. S. Razrabotka algoritma otsenki sostoyaniya izoliruyushchikh stykov na osnove integratsii apriornykh dannyykh [Development of an Algorithm for Assessing the Condition of Insulating Joints Based on Integration of a Priori Data], *Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]*, 2025, no. 2, pp. 204–206. EDN: VBLTBY (In Russian)
10. Mashtakov N. S., Chasov P. S. Prediktivnaya analitika: iz istoricheskikh dannyykh k strategicheskomu prognozirovaniyu [Predictive Analytics: from Historical Data to Strategic Forecasting], *Original'nye issledovaniya [Original Research]*, 2023, no. 13 (12), pp. 61–66. EDN: LKTDSY (In Russian)
11. Orlov A. Mashinnoe obuchenie dlya bol'shikh dannyykh [Machine Learning for Big Data], *Otkrytye sistemy. SUBD [Open Systems. DBMS]*, 2016, no. 1, pp. 26–27. EDN: VQCOER (In Russian)
12. Efanov D. V. Funktsional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: monografiya [Functional Control and Monitoring of Railway Automation and Telemechanics Devices: Monograph], Saint Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2016, 171 p. (In Russian)

Received: January 12, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Vadim A. NADEZHKIN — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport” at VSTU; v.nadezhkin@samgups.ru
Ilya S. BREDUN — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport” at VSTU; i.bredun@samgups.ru

УДК 624.154

Проблемы аварийности при всплытии паркинга и методы стабилизации путем применения анкерной (многовинтовой) сваи на примере одного из объектов в Санкт-Петербурге

Макаров А. Н., Кравченко П. А.

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

Для цитирования: Макаров А. Н., Кравченко П. А. Проблемы аварийности при всплытии паркинга и методы стабилизации путем применения анкерной (многовинтовой) сваи на примере одного из объектов в Санкт-Петербурге // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 443–455. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-443-455

Аннотация

Результаты многочисленных обследований, проведенных для зданий и сооружений, имеющих подземные этажи большого объема, указывают на возможность возникновения эффекта всплытия. Нередко оценкой всплытия подземных сооружений пренебрегают или подходят к этому вопросу формально. **Цель исследования:** анализ и реализация инженерных решений, направленных на предотвращение всплытия подземных паркингов в условиях повышенного уровня грунтовых вод. Исследование выполнено для одного из объектов, возведенного в южной части города Санкт-Петербурга, для которого в процессе эксплуатации потребовалась реализация мероприятий. В работе приведено краткое описание инженерно-геологических условий площадки строительства, обозначены основные проблемы рассматриваемого сооружения (дефекты, повреждения, деформации), возникшие в процессе эксплуатации. **Методы:** сформирована основная гипотеза наиболее вероятных причин возникновения дефектов, повреждений и деформаций объекта, выполнено моделирование, включающее в себя анализ гидростатического давления, а также методы стабилизации подобных сооружений. **Результаты:** проведена оценка надежности существующих инженерных решений и выявлены основные ошибки, допускаемые при строительстве. Анализируются результаты геотехнического моделирования и испытаний, выполненные с использованием комплекса PLAXIS 3D и статических испытаний свай, что позволяет сделать выводы о причинах и путях предотвращения всплытия паркингов. Реализованы решения по усилению с применением анкерных (многовинтовых) свай. **Практическая значимость:** разработан и реализован подход к устранению аварийности при всплытии паркинга, заключающийся в стабилизации путем применения анкерных (многовинтовых) свай, который может быть реализован и на других объектах строительства.

Ключевые слова: анкерная свая, испытания, несущая способность по грунту, проектирование анкерных конструкций, расчет несущей способности, винтовая свая

Введение

Сложившиеся в последнее время тенденции к более эффективному использованию территорий городской застройки вместе с растущими требованиями потребителей к качеству этой застройки вынуждают строителей в числе прочих решений активнее использовать подземное

пространство, возводя при строительстве зданий подземные этажи. Такие решения несут в себе ряд сопутствующих сложностей и проблем, которые требуют ответственного подхода, но нерешаемыми не являются. К сложностям, связанным с устройством подземных этажей в условиях плотной городской застройки, можно

отнести возникновение дополнительных деформаций окружающей застройки при откопке котлованов [1, 6], различные климатические воздействия, в том числе промораживание вскрытых котлованов и грунтов за их ограждениями [4], и многое другое. Нередко ошибки при проектировании приводят к последствиям, исправление которых является технически сложным и дорогостоящим мероприятием [7, 10].

Одна из важных задач освоения подземного пространства — обеспечение устойчивости подземных сооружений [2, 9]. В последние годы проблема всплытия таких конструкций стала особенно актуальной вследствие повышения уровня грунтовых вод из-за изменений природных условий и деятельности человека. Это требует более эффективных решений для стабилизации подобного рода сооружений, в том числе с учетом изменений гидрологических условий площадки.

На сегодняшний день в практике строительства к наиболее распространенным подходам, позволяющим предотвратить всплытие сооружений при избыточном гидростатическом давлении вытесненной воды, можно отнести понижение уровня грунтовых вод (к примеру, путем устройства дренажных систем), создание дополнительной нагрузки на конструкции (формирование пригруза) или устройство анкерных свай [5, 8]. Но практика обследования аварийных зданий и сооружений показывает, что имеющиеся апробированные расчетные методики не всегда помогают предотвратить всплытие сооружений. Чаще всего это связано со сложностью прогнозирования нарушений и отклонений от проектных решений, возникающих на этапе возведения или эксплуатации зданий.

Актуальность настоящей темы подтверждается практикой подземного строительства в Санкт-Петербурге. Авторам данной статьи

известно о пяти случаях всплытия подземных паркингов, произошедших только в 2023–2024 годах на различных строительных площадках города [3].

Рассматриваемый в настоящей статье случай произошел после завершения строительных работ подземного паркинга и возведения всех окружающих корпусов 5-этажных зданий на юге Санкт-Петербурга.

Причиной всплытия являлось действующее на паркинг гидростатическое давление, величина которого превышала давление, возникающее под подошвой плитного фундамента паркинга. Поступление воды под подошву плиты происходило через грунты обратной засыпки в пазухах бывшего котлована.

Инженерно-геологические условия участка

На рассмотренном объекте был выполнен комплекс инженерно-геологических изысканий, выделены инженерно-геологические элементы и определены основные характеристики грунтов (табл. 1). При прохождении геологических скважин на глубину до 28,0 м вскрыты безнапорные подземные воды, приуроченные к комплексу четвертичных отложений. Архивные данные показали, что на рассматриваемом участке фиксировалось сезонное (ежегодное) подтопление, вызванное колебанием уровня грунтовых вод (амплитуда колебаний составляла до 2,2 м). Присутствие подземных вод на рассматриваемой площадке связано с наличием гнезд и линз пылеватых песков, зафиксированных в ледниковых (g III) суглинках и супесях.

На момент проведения изысканий грунтовые воды были вскрыты на глубине от 0,1 до 1,4 м, что соответствует абсолютным отметкам БСВ 53,80–58,90 м. Такие уровни близки к максимальным для данного участка. В периоды дождей и снеготаяния при этом уровне

грунтовых вод происходит переувлажнение почвенно-растительного слоя, что, в свою очередь, приводит к дополнительной инфильтрации вод в грунтовый массив с формированием открытого зеркала на обширных участках.

Нормативная глубина сезонного промерзания для насыпных грунтов (ИГЭ-1) составляет 1,45 м; суглинков полутвердых, ожезненных (ИГЭ-2),

суглинков полутвердых (ИГЭ-3) — 0,98 м, для супесей твердых (ИГЭ-3б) составляет 1,20 м.

Инженерно-геологические условия площадки проектируемого строительства по совокупности факторов относятся к II категории сложности инженерно-геологических условий.

Напластование грунтов по одной из скважин приведено на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические характеристики грунтов

	Наименование грунтов	Плотн. грунта, г/см ³ ρII / ρI	Коэф. порист. (e)	Естест. влажн., д.е. We	Число пластич. (Ip)	Показат. текуч. (IL Сб)	Прочностные характеристики		Модуль деф., МПа кгс/см ² E
							Угол вн. трения, гр φII / φI	Сцепл., МПа СII / CI	
1	Насыпные грунты слежавшиеся (tIV)								
2	Суглинки полутвердые, ожезненные (gIII)	2,09/2,07	0,524	0,192	0,124	$\frac{0,13}{-0,03}$	23/20	0,038/ 0,025	$\frac{9}{90}$
3	Суглинки полутвердые (gIII)	2,09/2,09	0,560	0,198	0,139	$\frac{0,03}{-0,16}$	22/19	0,044/ 0,029	$\frac{12}{120}$
3б	Супеси твердые (gIII)	2,20/2,19	0,378	0,125	0,07	$\frac{-0,33}{-0,26}$	27/23	0,055/ 0,037	$\frac{19}{190}$
4	Глины твердые, дислоцированные (Cl disl)	2,07/2,07	0,620	0,215	0,190	$\frac{-0,17}{<-0,27}$	14/12	0,069/ 0,046	$\frac{15}{150}$
5	Глины твердые (Cl)	2,10/2,10	0,577	0,198	0,181	$\frac{-0,29}{<-0,27}$	16/11,4	0,076/ 0,051	$\frac{25}{250}$

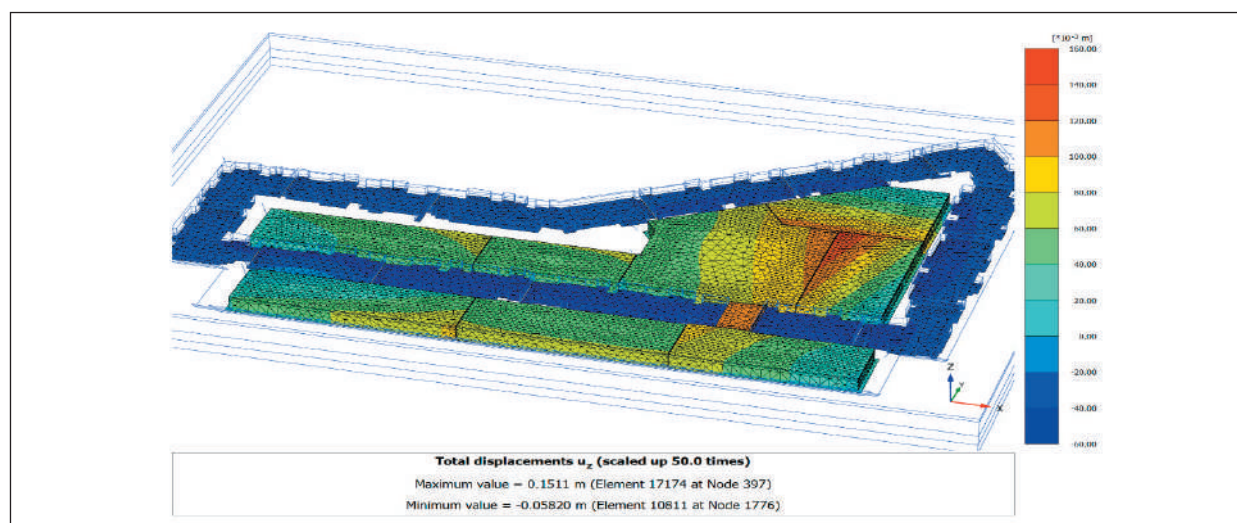


Рис. 1. Изополя вертикальных деформаций. Расчетный подъем (всплытие) паркинга — 15,1 см; осадка окружающих зданий — 5,8 см

Результаты визуального и инструментального обследования

Для формирования общего представления о проблемах, возникающих на объекте, было проведено техническое обследование. Большинство из отмеченных в конструкциях сооружения повреждений представлено трещинами. Часть трещин в наружных стенах, фундаментной плите и покрытии сопровождается протечками (рис. 2).

По результатам геодезической трехмерной съемки установлено, что для каждого из рассматриваемых блоков имеет место характерный подъем уровней поверхностей полов и нижней плоскости плиты покрытия, направленный от периферии к месту их взаимного примыкания, от 175 до 240 мм.

Результаты моделирования в PLAXIS 3D

В данном разделе выполнено расчетное моделирование геотехнической ситуации в программном комплексе PLAXIS 3D. По результатам расчетов получены перемещения паркинга с учетом текущих грунтовых условий и гидрогеологических условий.

Для моделирования грунтов основания была использована модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil Model, HSM), которая дает наиболее достоверные результаты, поскольку учитывает ветвь разгрузки (разгрузочный модуль деформации), а также упруго-пластические деформации грунта. Грунты достигают предельного состояния согласно выполнению условия Мора — Кулона (рис. 3).

В результате математического моделирования были определены деформации здания (деформации окружающей застройки) и самого паркинга. По результатам математического моделирования выявлена зона максимального подъема фундаментной плиты паркинга, вертикальная деформация в которой достигает, по расчетам, 15,1 см.

Также при моделировании определено, что при всплытии паркинга здания окружающей застройки получают дополнительную осадку, ее величина, по расчету, составила до 5,8 см. Графическая интерпретация деформаций здания паркинга в результате всплытия и дополнительных осадок окружающей застройки представлены ниже в виде изополей перемещений (рис. 4).



Рис. 2. Фото деформационного шва (слева) и трещины в капители (справа). Фото: А.М. Макарова

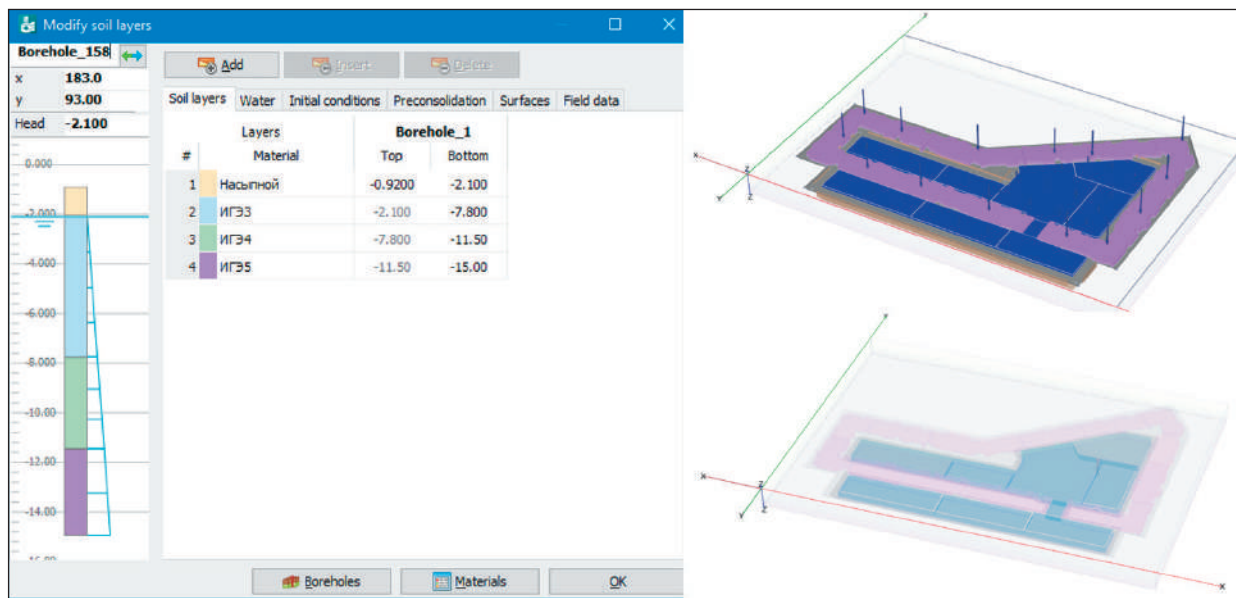


Рис. 3. Характеристики грунтов по одной из скважин (слева) и расчетная схема паркинга с окружающими зданиями (справа)

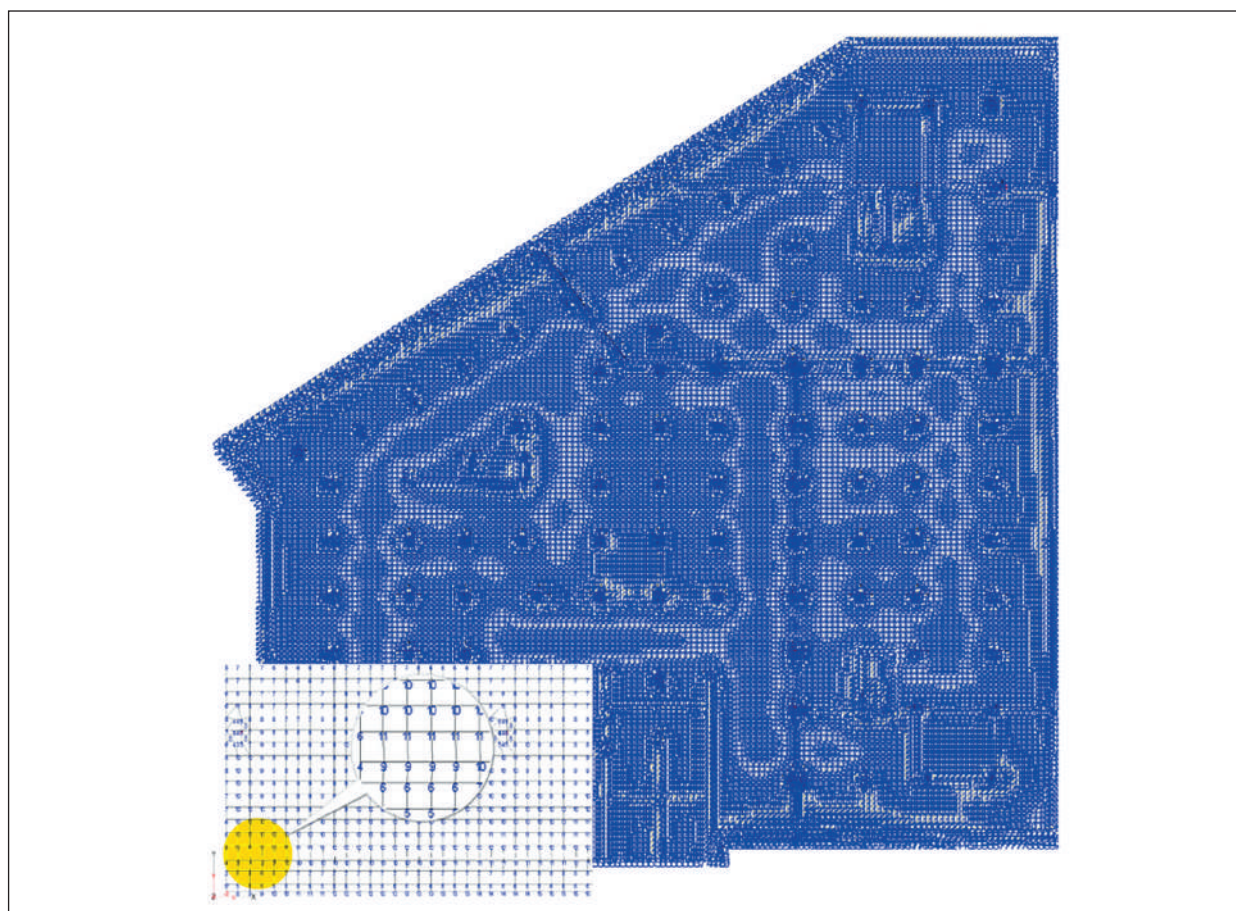


Рис. 4. Реакции в узлах от постоянных нагрузок. $\text{Max } A_z = 42,3 \text{ кН}$

По результатам расчетов в программе Plaxis 3D получено:

1. Осадки основания жилых зданий составляют $s = 5,8 < s_{max} = 15$ см. Относительная разность осадок не превышает предельной величины $(\Delta S/L)_u = 0,003$.

2. При высоте столба воды $\sim 4,5$ м (зеркало на абс. отм. +56,100 м) паркинг испытывает гидростатическое давление и всплывает. Подъем паркинга составляет до 15,1 см, что согласуется с результатами лазерного сканирования.

3. Основной причиной аварийного состояния паркинга является влияние гидростатического давления воды на днище, приводящее к дополнительным перемещениям конструкций, усилиям и трещинам.

Проверка паркинга на всплытие (аналитический расчет)

Дополнительно к уже представленным расчетным обоснованиям был выполнен аналитический расчет на всплытие. Нормативные нагрузки от сооружения приняты по расчету методом конечных элементов.

Суммарная постоянная нагрузка от рассмотренного фрагмента паркинга составила 157792,00 кН. При площади основания 4648,38 м² среднее давление по подошве составит 34 кН/м².

Высота столба воды до низа бетонной подготовки может достигать 4,6 м, то есть гидростатическое давление при этом составляет $pW = 46$ кН/м².

Даже если рассмотреть среднее значение уровня грунтовых вод (в среднем по скважинам высота столба воды составляет $\sim 3,8 \dots 3,9$ м), возникает угроза всплытия:

$P_N = 34$ кПа $< pW = 39$ кПа (перегрузка в 1,15 раза).

Для обеспечения надежной, безаварийной эксплуатации безопасным уровнем грунтовых вод является:

$$p_w = \frac{P_N}{\gamma_n} = \frac{34}{1,2} = 28,3 \text{ кПа,}$$

то есть высота столба воды относительно низа бетонной подготовки не должна превышать 2,8 м.

Стоит отметить, что данный расчет не учитывает неравномерную загрузку основания и является приближенным.

В результате расчета было установлено, что при неравномерном постоянном давлении по подошве фундамента гарантированный перепад УГВ относительно подошвы составляет 1,9 м (рис. 5).

Для решения проблемы необходимо либо снизить УГВ, либо компенсировать недостаточное давление. В качестве решения было выбрано применение анкерных свай.

Статическое испытание анкерной (многовинтовой) сваи

Целью проводимого исследования является определение фактической несущей способности по грунту погружаемых свай при приложении статической выдергивающей нагрузки для последующего учета полученных данных при проектировании компенсационных мероприятий, направленных на недопущение дальнейшего всплытия паркинга с учетом возможного максимального уровня грунтовых вод.

Для устройства и погружения свай на объекте была применена буровая установка «Электро М4» (рис. 6). Анкерная свая погружалась при помощи буровой установки.

Статические испытания применяемых анкерных свай на выдергивающую нагрузку на объекте выполнялись через тело фундаментной плиты подземного паркинга по методике, регламентированной ГОСТ 5686-2020, СП 24.13330.2021 и СТО 44416204-010-2010. Для испытаний была собрана установка (рис. 7).

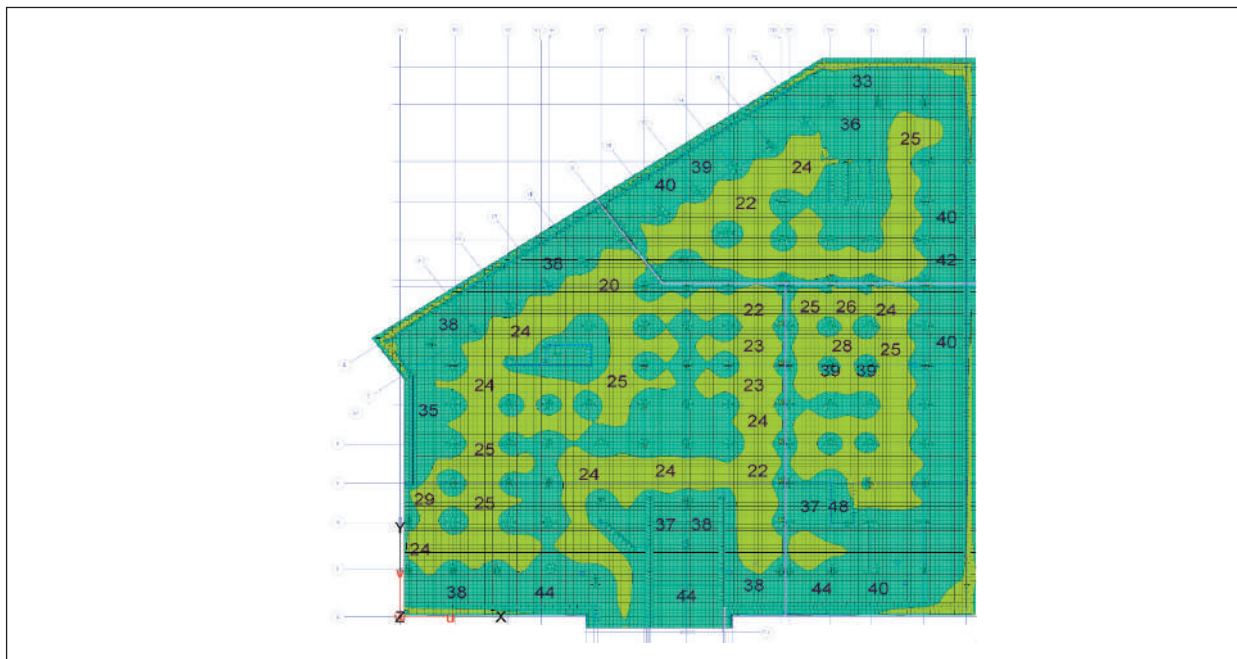


Рис. 5. Изополя давлений по подошве фундамента от постоянных нагрузок.
 $\text{Max } A_z = 562,76 \text{ кН/м}^2$, $\text{min } A_z = -498,428 \text{ кН/м}^2$

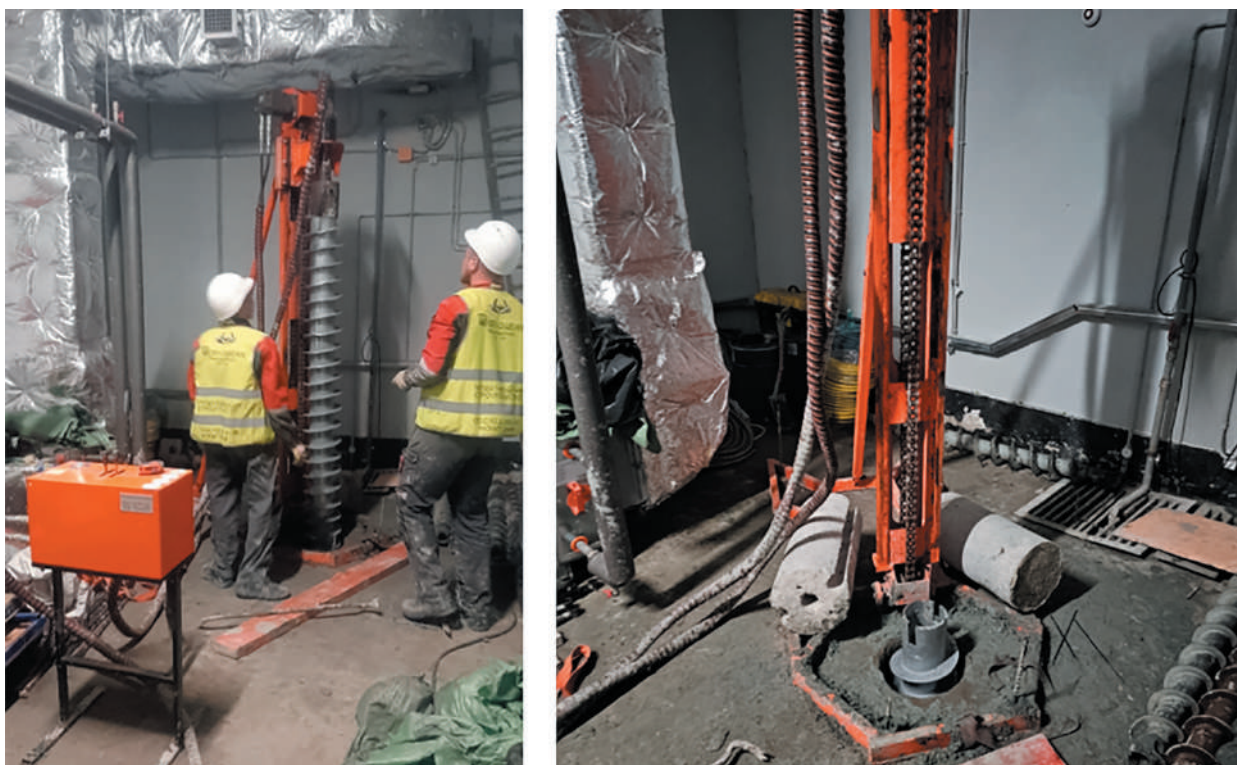


Рис. 6. Процесс устройства сваи (слева) и буровая установка «Электро М4» (справа).
Фото: А.М. Макарова

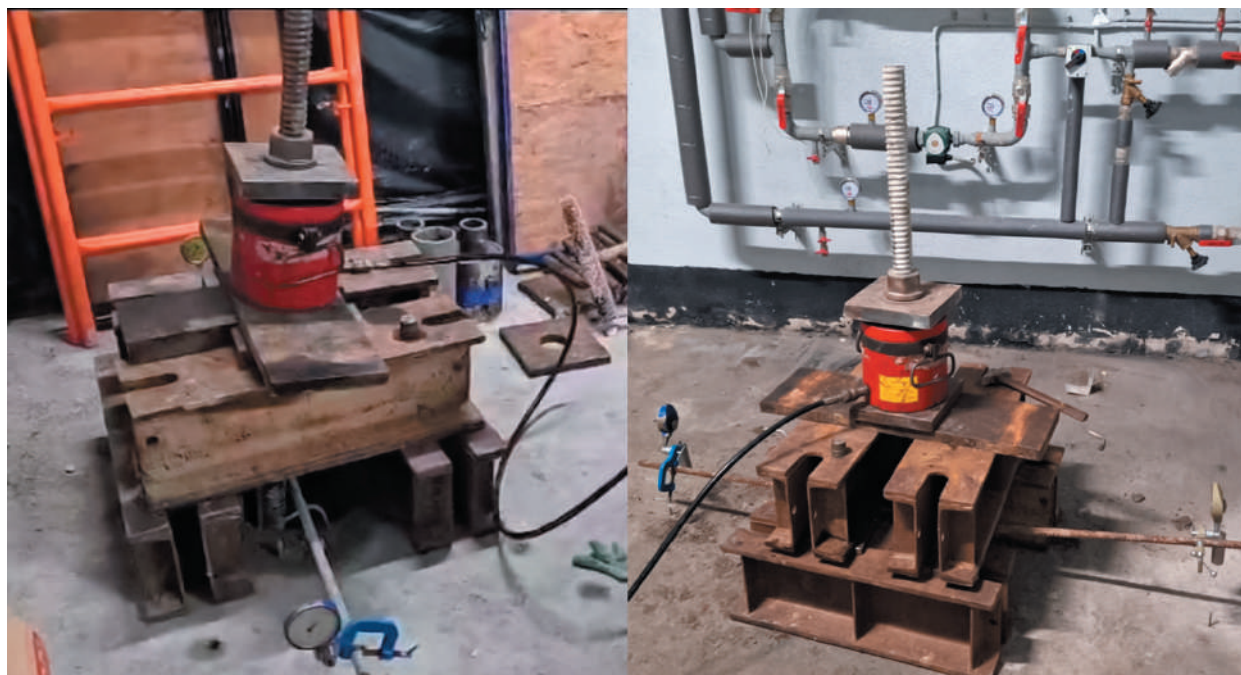


Рис. 7. Испытательная установка. Фото: А. М. Макарова

Для создания выдергивающей нагрузки при испытании анкерных свай применялись гидравлические домкраты. Грузоподъемность домкратов составляла 100 т. В соответствии с выбранной методикой испытания (в составе существующей фундаментной плиты) нагрузка от домкрата передавалась на силовую металлическую балку. Под силовую балку, в свою очередь, были подведены две металлические опоры, а для фиксации самой испытываемой сваи применялись специальные захваты.

Результаты статических испытаний свай выдергивающей нагрузкой представлены в виде графиков зависимости $s = F(P)$ (рис. 8).

Показатели осадки (вертикального перемещения) испытываемой сваи и соответствующие значения перемещений на каждой ступени нагружения (и разгрузки) приведены в табл. 2.

В соответствии с требованиями применяемой методики выдергивающая нагрузка к свае прикладывалась постепенно, ступенями. Для каждой ступени перед приложением следующей

нагрузки свая выдерживалась до стабилизации перемещения. В процессе нагружения давление фиксировалось по манометру.

Наблюдение за вертикальным перемещением испытываемой сваи относительно фундаментной плиты велось при помощи двух индикаторов перемещений (типа ПАО-6). Это позволяло фиксировать перемещения сваи с точностью до 0,01 мм.

Показания по перемещениям снимались для каждой ступени перед приложением нагрузки, сразу после нее и далее до стабилизации перемещений. Интервал снятия отсчетов составлял 15 минут, а в качестве критерия стабилизации принималось вертикальное перемещение сваи менее 0,1 мм на 30-минутный интервал (суммарно за два смежных отсчета), что соответствовало требованиям п. 8.5.4 ГОСТ 5686-2020. Нагружение велось до потери сваей несущей способности.

После этого приступали к поэтапной разгрузке свай. Работы выполнялись в обратном

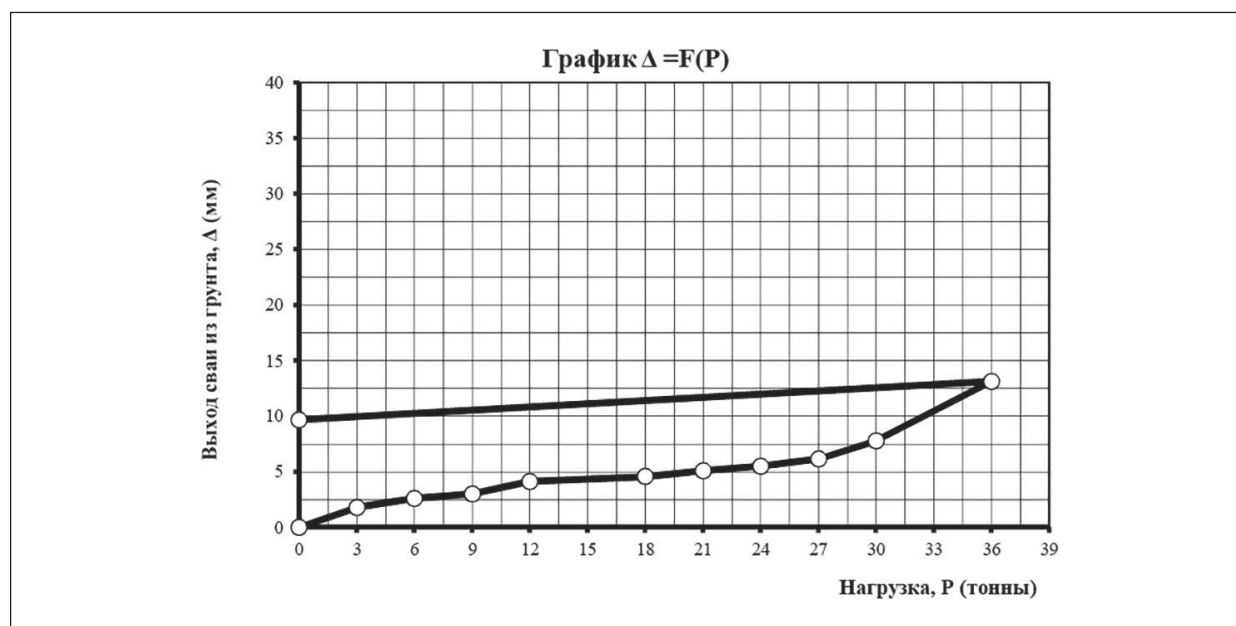


Рис. 8. График испытания сваи

ТАБЛИЦА 2. Результаты испытания сваи

Степень нагрузки (т)	Время выдержки за степень нагрузки (ч)	Осадка (мм)	
		С начала испытания	За степень нагрузки
0,00	0,00	0,00	0
3,0	0,50	1,76	1,76
6,0	0,50	2,60	0,84
9,0	0,50	3,00	0,40
12,0	0,50	4,13	1,13
18,0	0,50	4,55	0,42
21,0	0,50	5,08	0,53
24,0	0,50	5,47	0,39
27,0	0,50	6,15	0,68
30,0	0,50	7,78	1,63
36,0	0,50	13,12	5,34
РАЗГРУЗКА			
0,0	0,50	9,67	-3,45

порядке с сохранением критериев по стабилизации, но если на каждой следующей ступени нагрузка увеличивалась на 3 т, то при разгрузке величина снимаемой нагрузки для каждой ступени составляла 6 т. После полного снятия нагрузки наблюдения продолжались еще в течение 4 циклов (60 минут).

Испытание проводилось для сваи следующей конструкции:

- винтовая многовитковая свая;
- свая с диаметром 127/250 мм.

Инженерно-геологические условия в сопоставлении с примененной конструкцией винтовых свай показаны на рис. 9.

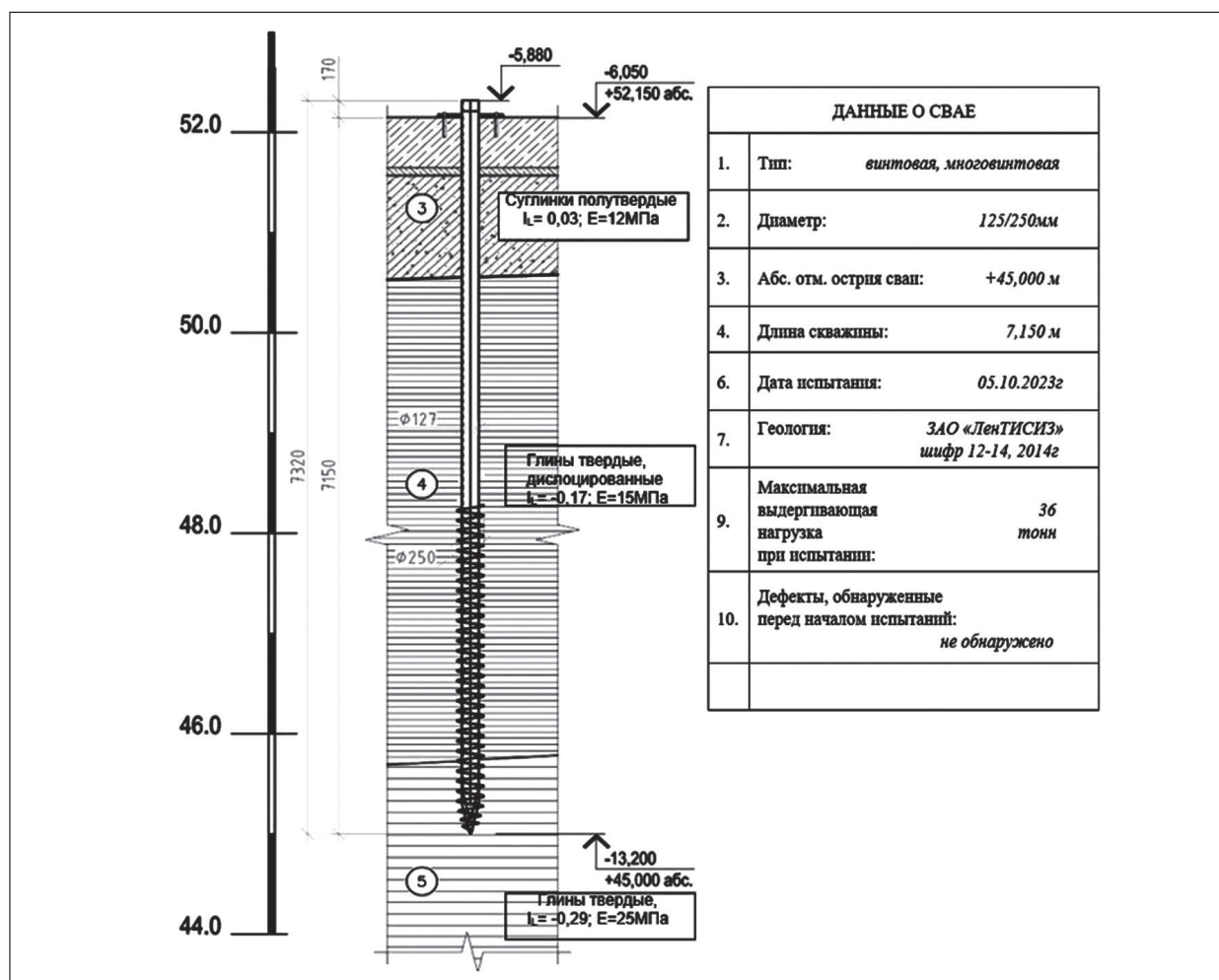


Рис. 9. Инженерно-геологические условия по одной из скважин и конструкция применяемой сваи

Расчет несущей способности лопасти для применяемой винтовой сваи выполнялся по общеизвестной формуле (формула 7.18 СП 24.13330.2021):

$$F_{d0} = (\alpha_1 c_1 + \alpha_2 \gamma_1 h_1)$$

$$A = (8,4 \cdot 3,56 + 3,3 \cdot 1,9 \cdot 5,5) \cdot 0,0364 = 2,34 \text{ т.}$$

Максимальная выдергивающая нагрузка:

$$N = 2,34 \cdot \frac{10}{1,4} = 16,7 \text{ т.}$$

Примечание. Коэффициент пористости, угол внутреннего трения, удельное сцепление, использованные для вычислений, приняты по СП 22.13330.2016 «Основания и фундаменты».

Заключение

Проблема всплытия подземных сооружений, таких как паркинги, вследствие повышенного уровня грунтовых вод требует особого внимания при проектировании и строительстве в урбанизированных зонах. В ходе данного исследования, проведенного на конкретном примере в Санкт-Петербурге, установлено, что основными факторами, вызывающими всплытие, являются ошибки при анализе инженерно-геологических условий и недостаточная оценка гидростатического давления.

Произведенные расчеты с использованием программы PLAXIS 3D подтвердили, что

существующий вес конструкции недостаточен для предотвращения подъема. Результаты испытаний свай подтвердили необходимость натуральных экспериментов, которые позволяют определить ряд закономерностей, недоступных при формировании теоретической модели.

Как показали натурные испытания свай на объекте, только полученные в их ходе данные можно закладывать в расчеты дальнейшего проектирования по пластичным (глинистым) грунтам, так как теоретические расчеты дают большую погрешность (до 46%). Это связано с тем, что в теоретических расчетах не учитываются особенности работы свай в составе конструкций.

Для минимизации рисков всплытия предлагается усиление дренажных систем, увеличение веса зданий и применение анкерных свай с более высокой несущей способностью. Таким образом, работа подчеркивает важность комплексного подхода к проектированию подземных сооружений, что включает тщательное исследование геологических условий и применение современных методов анализа и моделирования.

Список источников

1. Беляева Е. А., Дьяконов И. П. Проблемы проектирования и строительства новых зданий вблизи окружающей исторической застройки // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 76–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-76-82

2. Богов С. Г., Шашкин А. Г., Шашкин В. А. Обеспечение сохранности окружающей застройки при освоении подземного пространства в условиях слабых грунтов // Геотехника. 2022. Т. 14, № 1. С. 50–63. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-1-50-62. EDN OSVNJX

3. Гурский А. В., Левинтов Г. В. Проблемы неравномерного всплытия подземного паркинга в Санкт-Петербурге // Вестник Пермского национального

исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10, № 3. С. 16–25. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.02. EDN QKDKJY

4. Метелкин С. В., Парамонов В. Н. Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, вып. 1. С. 133–142. DOI: 10.20295/1815-588X2022-1-133-142

5. Носков И. В., Блок К. И. Теоретические и практические составляющие натуральных экспериментов многолопастных винтовых свай // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 1. EDN CAPYNV

6. Парамонов В. Н. Горизонтальные смещения свай при разработке котлована // Геотехника. 2018. Т. 10, № 4. С. 46–57.

7. Парамонов М. В., Сливец К. В., Кравченко П. А. Анализ ошибок при проектировании капитальных ремонтов зданий на примере памятника архитектуры в Санкт-Петербурге // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений: межвузовский тематический сборник трудов. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 33–43.

8. Исследование несущей способности анкерных конструкций, устраиваемых по технологии бурения трубчатými винтовыми штангами / Д. Ю. Соловьев [и др.] // Геотехника. 2023. Т. 15, № 1. С. 24–39. DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-1-24-39. EDN DEFVVG

9. Шашкин А. Г., Васенин В. А., Парамонов В. Н. Развитие сверхнормативных деформаций городской застройки при строительстве подземных сооружений метрополитена // Жилищное строительство. 2020. № 9. С. 34–43. DOI 10.31659/0044-4472-2020-9-34-43. EDN FNZSGR

10. Шашкин А. Г., Шашкин В. А. Можно ли обеспечить сохранность памятников, опираясь на нормы для нового строительства? // Геотехника. 2021.

T. 13, № 2. С. 20–31. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-2-20-30

Дата поступления: 13.02.2026

Решение о публикации: 21.04.2026

Контактная информация:

МАКАРОВ Алексей Николаевич — аспирант;

StroiGidroSpas@yandex.ru

КРАВЧЕНКО Павел Александрович — кандидат

техн. наук; pasha.sky@gmail.com

Problems of Emergency Situations When Parking Is Surfaced and Methods of Stabilization by Using an Anchor (Multi-Screw) Pile on the Example of One of the Facilities in St. Petersburg

A. N. Makarov, P. A. Kravchenko

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

For citation: *Makarov A.N., Kravchenko P.A.* Problems of Emergency Situations When Parking Is Surfaced and Methods of Stabilization by Using an Anchor (Multi-Screw) Pile on the Example of One of the Facilities in St. Petersburg // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 443–455. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-443-455 (In Russian)

Abstract

The results of numerous surveys conducted for buildings and structures with large underground floors indicate the possibility of an ascent effect. It is not uncommon for the assessment of the surfacing of underground structures to be neglected or to approach this issue formally. **Objective:** analysis and implementation of engineering solutions aimed at preventing the surfacing of underground parking lots in conditions of elevated groundwater levels. The study was carried out for one of the facilities erected in the southern part of the city of St. Petersburg, which required the implementation of measures during operation. The paper provides a brief description of the engineering and geological conditions of the construction site, identifies the main problems of the structure under consideration (defects, damages, deformations) that arose during operation. **Methods:** the basic hypothesis of the most probable causes of defects, damages and deformations of the object is formed, modeling is performed, and it includes an analysis of hydrostatic pressure, as well as methods for stabilizing such structures. **Results:** the reliability of existing engineering solutions was assessed and the main errors made during construction were identified. The results of geotechnical modeling and tests performed using the PLAXIS 3D complex and static pile tests are analyzed, which allows us to draw conclusions about the causes and ways to prevent parking from surfacing. Reinforcement solutions using anchor (multi-screw) piles have been implemented. **Practical significance:** an approach to eliminating accidents during parking surfacing has been developed and implemented, consisting in stabilization through the use of anchor (multi-screw) piles, which can be implemented at other construction sites.

Keywords: anchor pile, testing, soil bearing capacity, anchor structure design, bearing capacity calculation, screw pile

References

1. Belyaeva E. A., Diakonov I. P. Problemy proektirovaniya i stroitel'stva novykh zdaniy vblizi okruzhayushchej istoricheskoy zastrojki [Problems

of Design and Construction of New Buildings Near an Adjacent Historical Development Area], *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2021, no. 1 (84), pp. 76–82. URL:

<https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-1-76-82> (In Russian)

2. Bogov S.G., Shashkin A.G., Shashkin V.A. Obespechenie sokhrannosti okruzhayushchej zastrojki pri osvoenii podzemnogo prostranstva v usloviyakh slabykh gruntov [Ensuring the Safety of Surrounding Structures during the Development of Underground Space in Weak Soil Conditions], *Geotechnics*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 50–63. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-1-50-62. EDN OSVNJX (In Russian)

3. Gurskij A.V., Levintov G.V. Problemy neravnomernogo vsplytiya podzemnogo parkinga v Sankt-Peterburge [Issues of Uneven Uplifting of the Underground Parking in St. Petersburg], *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 16–25. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.02. EDN QKDKJY (In Russian)

4. Metelkin S.V., Paramonov V.N. Moroznoe puchenie i ego vliyanie na raspornuyu sistemu ograzhdayushchikh konstruksij glubokikh kotlovanov [Frost Heave and Its Influence on Spacer System of Enclosing Constructions of Deep Ditches], *Proceedings of Petersburg State Transport University*, Saint-Petersburg, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 133–142. DOI: 10.20295/1815-588X2022-1-133-142 (In Russian)

5. Noskov I.V., Blok K.I. Teoreticheskie i prakticheskie sostavlyayushchiesostavnykh vintovykh svaj [Theoretical and Practical Components of Field Experiments with Multi-Blade Screw Piles], *Bulletin of Eurasian Science*, 2023, vol. 15, no. 1. EDN CAPYNV (In Russian)

6. Paramonov V.N. Gorizontaľnye smeshcheniya svaj pri razrabotke kotlovana [Horizontal Displacements of Piles During Pit Excavation], *Geotechnics*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 46–57. (In Russian)

7. Paramonov M.V., Slivets K.V., Kravchenko P.A. Analiz oshibok pri proektirovanii kapital'nykh remontov zdaniy na primere pamyatnika arkhitektury v Sankt-Peterburge [Error Analysis in the Design of the Building

Overhaul Using the Example of the Architectural Monument in Saint-Petersburg], *Design and Construction Issues of Above-Ground and Underground Structures of Buildings and Structures: Interuniversity Thematic Collection of Papers*, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018, pp. 33–43. (In Russian)

8. Solovyev D. Yu., et al. Issledovanie nesushchej sposobnosti ankernykh konstruksij, ustraivaemykh po tekhnologii bureniya trubchatymi vintovymi shtangami [Investigation of the Load-Bearing Capacity of Anchor Structures Installed by Drilling with Tubular Screw Rods], *Geotechnics*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 24–39. DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-1-24-39. EDN DEFVVG (In Russian)

9. Shashkin A.G., Vasenin V.A., Paramonov V.N. Razvitie sverkhnormativnykh deformatsij gorodskoj zastrojki pri stroitel'stve podzemnykh sooruzhenij metropolitena [Development of Excessive Deformations in Urban Construction during the Construction of Underground Structures of the Metro], *Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing Construction]*, 2020, no. 9, pp. 34–43. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-34-43. EDN FNZSGR (In Russian)

10. Shashkin A.G., Shashkin V.A. Mozhno li obespechit' sokhrannost' pamyatnikov, opirayas' na normy dlya novogo stroitel'stva? [Is It Possible to Preserve Historical Monuments on the Basis of Standards for New Construction?], *Geotechnics*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 20–31. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-2-20-30 (In Russian)

Received: February 13, 2026

Accepted: April 21, 2026

Author's information:

Alexey N. MAKAROV — Postgraduate Student;
StroiGidroSpas@yandex.ru

Pavel A. KRAVCHENKO — PhD in Engineering,
Associate Professor; pasha.sky@gmail.com

УДК 624.04

Устойчивость каркаса при прогрессирующем обрушении и воздействии переменной температуры

А. А. Шульгин

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

Для цитирования: Шульгин А. А. Устойчивость каркаса при прогрессирующем обрушении и воздействии переменной температуры // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 456–461. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-456-461

Аннотация

Цель: исследовать влияние нестационарных (циклических) температурных воздействий на устойчивость стержневой системы каркаса в расчетах на прогрессирующее обрушение. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения безопасности зданий, эксплуатирующихся в условиях экстремальных климатических колебаний, в частности в регионах Крайнего Севера. **Методы:** в основе исследования лежит численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР. Была рассмотрена пространственная кинематическая схема каркаса из перекрестных балок и колонн. Расчет выполнялся квазистатическим методом с учетом комбинированного воздействия постоянной вертикальной нагрузки и циклического температурного поля, заданного симметричным гармоническим законом с заданной амплитудой и периодом. Проведено сравнение результатов для стационарного и нестационарного тепловых режимов, а также для сценариев с тепловым воздействием на все элементы и только на элементы балочной клетки. **Результаты:** установлено, что учет нестационарного (циклического) характера температуры приводит к существенному изменению коэффициента запаса устойчивости формы по сравнению со стационарным режимом. В фазе снижения температуры запас устойчивости в среднем на 12% ниже, а в фазе повышения — на 13% выше, чем при постоянном температурном воздействии. Максимальное снижение общего коэффициента запаса при циклическом воздействии достигает 14–16%. При этом прямое тепловое воздействие на колонны оказывает меньшее влияние (разница до 7%). Минимальное значение коэффициента запаса (64,2) зафиксировано для расчетного сочетания нагрузок № 6 с учетом циклической температуры на всех элементах. **Практическая значимость:** результаты работы доказывают значимость фактора переменных температур для точной оценки устойчивости конструкций при прогрессирующем обрушении. Сделан вывод о необходимости развития и дополнения действующих методов расчета (включая нормативные документы) с учетом нестационарных циклических тепловых воздействий. Это особенно важно для проектирования зданий и сооружений в северных широтах, а также для объектов промышленности с технологическими тепловыми циклами.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, здания и сооружения, переменное температурное воздействие, устойчивость

В настоящей статье представлены материалы исследования нестационарного теплового воздействия на устойчивость каркаса в расчетах на прогрессирующее обрушение. Предметом исследования является устойчивость стержневой системы в условиях прогрессиру-

ющего обрушения и воздействия стационарной и переменной температуры на стержни. Объектом исследования — стержневая система в условиях прогрессирующего обрушения и воздействия стационарной и переменной температуры на стержни.

Постановка задачи

Рассматривается система перекрестных балок прямоугольного поперечного сечения, которая служит аутригерной несущей конструкцией перекрытия, опертой на колонны, и может располагаться на любом из этажей многоэтажного здания, а также в качестве перекрытия технологических помещений без опоры в промежуточных узлах для создания большей площади помещения. Соединение балок в местах их пересечения жесткое. Опираание балок на колонны принято шарнирно-подвижным (рис. 1).

В качестве материала конструкций принят условный бетон марки В25, воспринимающий сжимающие и растягивающие напряжения. Физико-механические характеристики имеют следующие величины [1]:

- модуль упругости $E = 30\,000$ МПа;
- коэффициент линейного температурного расширения $\alpha = 10^{-5}$ 1/град.

Для элементов балочной клетки принято прямоугольное сечение высотой $h = 40$ см, шириной $b = 20$ см, для колонн — $h = 30$ см, шириной $b = 30$ см.

Балочная клетка нагружена вертикальной, равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью $q = 6$ кН/м на все стержни балочной клетки. Циклическое изменение температуры задавалось с симметричным циклом с законом изменения:

$$T_1(t) = T \cos \frac{2\pi}{t_c} t. \quad (1)$$

Начальная температура цикла $T = 20^\circ\text{C}$, максимальное изменение температуры $T = 40^\circ\text{C}$, период цикла принимается $t_c = 0,8$.

Метод решения задачи — квазистатический с применением коэффициента динамичности $K_d = 1$ к реакции удаленной опоры и поправочных коэффициентов $k_M(h, t_c)$ при моделировании циклических температурных воздействий [3].

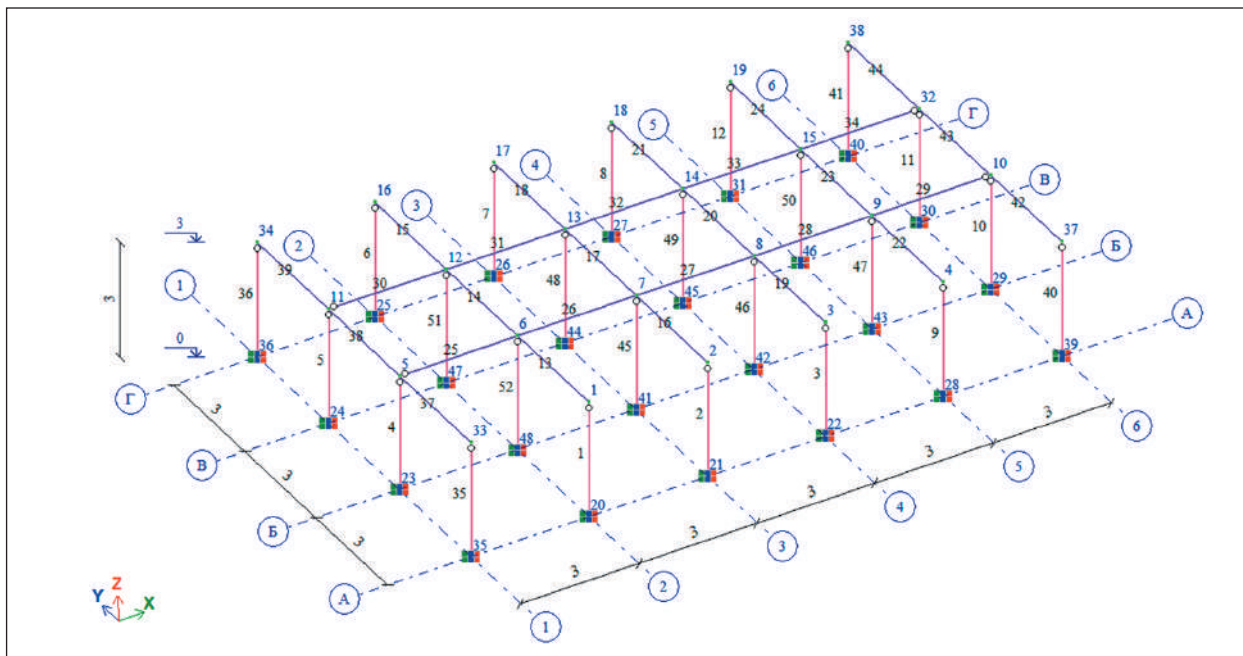


Рис. 1. Пространственная схема каркаса с нумерацией узлов и цветовым отображением типов элементов

Результаты расчетов

Проведен анализ устойчивости элементов системы после удаления элемента № 52 и моделировании температурного воздействия на окружающие элементы внутри помещения. При учете нестационарного температурного воздействия в начале цикла, когда температура на гранях уменьшается, коэффициент запаса устойчивости формы меньше в среднем на 12% по сравнению со стационарным воздействием, с увеличением

температуры коэффициент запаса становится больше в среднем на 13%, чем при соответствующем стационарном воздействии. Разница между коэффициентами запаса при учете температурного воздействия на колонны и без учета такого воздействия составляет не более 7%. Минимальный коэффициент запаса устойчивости формы обнаружен в сценарии, которому соответствует расчетное сочетание нагрузок № 6, и составляет значение 64,2 (см. таблицу).

ТАБЛИЦА. Сравнительная таблица значений коэффициентов запаса устойчивости формы

№ РСН	Форма устойчивости											X, %
	1		2		3		4		\bar{X}_{1-4} , %	5		
	КЗУ	%	КЗУ	%	КЗУ	%	КЗУ	%		КЗУ	%	
без теплового воздействия на колонны												
1 3	120,8 107,3	-11	120,8 107,3	-11	133,8 112,1	-16	133,8 112,1	-16	-14	139,6 137,5	-2	-11
2 4	72,4 87,3	+21	72,4 87,3	+21	76,0 88,4	+16	76,0 88,4	+16	+18	122,4 129,2	+6	+16
с тепловым воздействием на колонны												
5 7	113,1 100,9	-11	113,1 100,9	-11	120,0 103,3	-14	120,0 103,3	-14	-12	120,8 134,8	+12	-8
6 8	64,2 81,9	+28	64,2 81,9	+28	68,8 84,0	+22	68,8 84,0	+22	+25	117,6 126,9	+8	+21

Примечание.

В числителе указаны значения стационарного режима; в знаменателе — нестационарного.

РСН (расчетные сочетания нагрузок):

РСН 1 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (-40 °С);

РСН 2 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (+40 °С);

РСН 3 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (-40 °С) · кМ = 0,35;

РСН 4 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки (+40 °С) · кМ = 0,35;

РСН 5 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки и колонны (-40 °С);

РСН 6 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки и колонны (+40 °С);

РСН 7 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки · кМ = 0,35 и колонны (-40 °С);

РСН 8 — постоянная нагрузка (6 кН/м) + реакция опоры мгновенного удаления (40 кН) + температурная нагрузка на балки · кМ = 0,35 и колонны (+40 °С);

КЗУ — коэффициент запаса устойчивости (формы).

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует значимое влияние переменных температурных воздействий на устойчивость каркасных систем в условиях прогрессирующего обрушения. Коэффициент запаса устойчивости формы незначительно зависит от температурного воздействия на колонны (не более 7%), но значительно — при учете нестационарного режима и может уменьшаться на 14–16%.

Таким образом, для повышения достоверности расчетов на прогрессирующее обрушение зданий, особенно расположенных в регионах с суровым климатом или подверженных технологическим тепловым воздействиям, необходимо развитие методов, учитывающих нестационарные циклические температурные воздействия на элементы конструкции каркасов.

Список источников

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
2. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика: учебник для строит. спец. вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.
3. Пегин П.А., Шульгин А.А., Павловец Н.В. Определение максимальных растягивающих и сжимающих напряжений статически неопределимых стержней при отнулевом цикле изменения температуры // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2025. № 9 (1093). С. 26–30.
4. Пегин П.А., Шульгин А.А. Особенности расчета прогрессирующего обрушения каркасной схемы сооружения при таянии грунтов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 8 (1068). С. 12–14.

5. Pegin P. A., Shulgin A. A. Modern methods for calculating transport infrastructure objects for progressive collapse // BRICS Transport. 2023. Vol. 2, no. 3.

6. Шульгин А. А. Расчет упругих стержней и стержневых систем при циклических тепловых воздействиях: выпускная квалификационная работа. СПб.: ГАСУ, 2018. 119 с.

7. Шульгин А.А. Исследование напряженного состояния упругого стержня при циклических тепловых воздействиях // Наука и инновации в технических университетах: материалы XIII Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 23–25 октября 2019 г.). СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. С. 27–28.

8. Шульгин А.А. О некоторых особенностях напряженного состояния упругого стержня при циклическом тепловом воздействии // Современное строительство: сборник статей магистрантов и аспирантов. Т. 1, вып. 2. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. С. 161–172.

9. Шульгин А.А., Абу-Хасан М.С. Повышение эффективности каркасов зданий и сооружений для северных районов РФ в условиях прогрессирующего разрушения // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2022 г.): в 2 т. Т. 1. СПб.: ПГУПС, 2022. С. 303–307.

Дата поступления: 02.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

ШУЛЬГИН Алексей Александрович – аспирант;
aashulgin.workstudy@gmail.com

Stability of the Frame During Progressive Collapse and Exposure to Variable Temperature

A. A. Shul'gin

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

For citation: *Shul'gin A. A. Stability of the Frame During Progressive Collapse and Exposure to Variable Temperature // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 456–461. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-456-461 (In Russian)*

Abstract

Objective: to investigate the influence of non-stationary (cyclic) temperature exposures on the stability of a frame rod system in progressive collapse calculations. The relevance of the work is driven by the need to ensure the safety of buildings operating under extreme climatic fluctuations, particularly in the Far North regions. **Methods:** the study is based on numerical modeling using the finite element method in the LIRA-SAPR software package. A spatial kinematic scheme of a frame consisting of cross beams and columns was analyzed. The calculation was performed using a quasi-static method, considering the combined effect of a constant vertical load and a cyclic temperature field defined by a symmetric harmonic law with specified amplitude and period. A comparison of results for steady-state and non-steady-state thermal regimes was conducted, as well as for scenarios with thermal exposure on all elements and only on the beam grid elements. **Results:** it was found that accounting for the non-stationary (cyclic) nature of temperature leads to a significant change in the stability safety factor compared to the steady-state regime. During the cooling phase, the stability margin is on average 12% lower, and during the heating phase, it is 13% higher than under constant temperature exposure. The maximum overall reduction in the safety factor under cyclic exposure reaches 14-16%. Meanwhile, direct thermal exposure on the columns has a lesser effect (difference up to 7%). The minimum safety factor value (64.2) was recorded for load combination No. 6, considering cyclic temperature on all elements. **Practical significance:** the results demonstrate the significance of variable temperature factors for the accurate assessment of structural stability in progressive collapse. A conclusion is drawn about the necessity to develop and supplement current calculation methodologies (including regulatory documents) to account for non-stationary cyclic thermal exposures. This is particularly important for designing reliable buildings and structures in northern latitudes, as well as for industrial facilities with technological thermal cycles.

Keywords: progressive collapse, buildings and structures, variable temperature effects, stability

References

1. SP 63.13330.2018. *Betonnnye i zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovnyepolozheniya. Aktualizirovannaya [Concrete and Reinforced Concrete Structures. The Main Provisions]. Updated edition of SNiP 52-01-2003. (In Russian)*
2. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika: uchebnik dlya stroit. spets. vuzov [Construction Mechanics: A Textbook for Builders. Spec. Universities], 8th ed., revised and add., Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1986, 607 p. (In Russian)*
3. Pegin P.A., Shul'gin A.A., Pavlovets N.V. *Opreделение maksimal'nykh rastyagivayushchikh i szhimayushchikh napryazhenij staticheskoi neopredelimykh sterzhnej pri otnulevom tsikle izmeneniya temperatury [Determination of the Maximum Tensile and Compressive Stresses of Statically Indeterminate Rods During a Zero-Point Temperature Change Cycle], BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki [BST: Bulletin of Construction Machinery], 2025, no. 9 (1093), pp. 26–30. (In Russian)*

4. Pegin P.A., Shul'gin A.A. Osobennosti rascheta progressiruyushchego obrusheniya karkasnoj skhemy sooruzheniya pri tayanii gruntov [Features of Calculating the Progressive Collapse of the Frame Scheme of a Structure During Soil Melting], *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki [BST: Bulletin of Construction Machinery]*, 2023, no. 8 (1068), pp. 12–14. (In Russian)
5. Pegin P. A., Shul'gin A. A. Modern Methods for Calculating Transport Infrastructure Objects for Progressive Collapse, *BRICS Transport*, 2023, vol. 2, no. 3.
6. Shul'gin A.A. Raschet uprugikh sterzhnej i sterzhnevnykh sistem pri tsiklicheskih teplovykh vozdeystviyakh: vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota [Calculation of Elastic Rods and Rod Systems under Cyclic Thermal Effects: Final Qualifying Work], Saint Petersburg, *GASU [State Automated Information System "Management"]*, 2018, 119 p. (In Russian)
7. Shul'gin A.A. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya pri tsiklicheskih teplovykh vozdeystviyakh [Investigation of the Stress State of an Elastic Rod Under Cyclic Thermal Influences], Science and Innovation in Technical Universities: Proceedings of the Thirteenth All-Russian Forum of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, October 23–25, 2019, Saint Petersburg, *Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo [Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University]*, 2019, pp. 27–28. (In Russian)
8. Shul'gin A.A. O nekotorykh osobennostyakh napryazhennogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya pri tsiklicheskom teplovom vozdeystvii [On Some Features of the Stress State of an Elastic Rod Under Cyclic Thermal Action], *Sovremennoe stroitel'stvo: sb. statej magistrantov i aspirantov [Series "Modern construction": Collection of Articles by Undergraduates and Postgraduates]*, vol. 1, iss. 2, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2019, pp. 161–172. (In Russian)
9. Shul'gin A.A., Abu-Hassan M.S. Povyshenie effektivnosti karkasovzdanij i sooruzhenij dlya severnykh rajonov RF v usloviyakh progressiruyushchego razrusheniya [Improving the Efficiency of Building Frames and Structures for the Northern Regions of the Russian Federation in Conditions of Progressive Destruction], *Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXXII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, in two volumes, St. Petersburg, April 18–25, 2022*, Saint Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 2022, vol. 1, pp. 303–307. (In Russian)

Received: February 02, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Aleksei A. SHUL'GIN — Postgraduate Student;
aashulgin.workstudy@gmail.com

УДК 624.042.12

Изменение напряженно-деформированного состояния тоннельной камеры после капитального ремонта вентиляционной шахты

А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков

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

Для цитирования: Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Изменение напряженно-деформированного состояния тоннельной камеры после капитального ремонта вентиляционной шахты // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 462–472. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-462-472

Аннотация

Цель: выполнить оценку изменения напряженно-деформированного состояния обделки тоннельной камеры, находящейся под вентиляционной шахтой и испытывающей на себе давление пеностеклобетона — слоя конструкционного усиления и утепления шахты. **Методы:** исследование было выполнено в плоской и объемной постановках методом Метрогипротранса (Hyperstatic Reaction Method, HRM) и методом конечных элементов. **Результаты** расчета были сопоставлены между собой через соответствующие коэффициенты запаса несущей способности обделки тоннельной камеры. В результате исследования обнаружена удовлетворительная сходимость методик расчета друг с другом. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы для расчета сложных пространственных конструкций, работу которых можно свести к аркам.

Ключевые слова: тоннель, обделка, численное моделирование, метод конечных элементов, метод Метрогипротранса

Введение

При эксплуатации вентиляционных шахт метрополитена в условиях знакопеременных температур водоносные грунты в заобделочном пространстве периодически промерзают, что приводит к локальным силовым воздействиям расширяющегося льда на обделку с образованием трещин и сколов. Как правило, после длительного периода эксплуатации (30–40 лет) наступает необходимость в капитальном ремонте шахты с созданием внутреннего армированного слоя монолитного бетона (обоймы). В предыдущем исследовании [1] авторы предложили использовать в качестве такого слоя особый материал — пеностеклобетон [2], состав которого подобран как для конструкционного уси-

ления обделки шахты, так и для ее утепления. В 2021 году подобная технология была с успехом опробована при капитальном ремонте вентиляционной шахты глубиной 20 м и рекомендована как типовое решение для капитального ремонта вентиляционных шахт Петербургского метрополитена.

При разработке капитального ремонта одной из вентиляционных шахт возникла необходимость в проведении дополнительных исследований. Сложность данного случая была вызвана особым конструктивным решением шахты. Она расположена непосредственно над перегонным тоннелем и была предназначена для пуска тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК). Таким образом,

в нижней части шахты была устроена монолитная щитовая камера для монтажа ТПМК. После окончания проходческих работ шахта была переоборудована в вентиляционную. Для этого в объеме щитовой камеры была создана еще одна, тоннельная, камера, разделяющая пути передвижения поездов и воздуха.

Создание слоя пеностеклобетона (рубашки), примыкающего к обделке шахты, возможно выполнить, только оперев этот слой непосредственно на обделку тоннельной камеры. При этом сложным научным вопросом является то, какая именно часть от веса слоя пеностекла будет передана обделке тоннельной камеры, а какая воспринята обделкой шахты либо же щитовой камерой. В свою очередь, с инженерной точки зрения требовалось создать такую численную модель, которая учла бы самый неблагоприятный вариант нагружения тоннельной камеры.

Таким образом, целью исследования являлась оценка изменения напряженно-деформи-

рованного состояния тоннельной камеры при передаче на нее нагрузок от слоя пеностеклобетона обделки шахты при ее капитальном ремонте.

Для этого были поставлены следующие задачи:

- создание стержневой 2D-модели тоннельной камеры и определение внутренних усилий по методу Метрогипротранса;
- создание 3D-модели всего рассматриваемого узла в грунтовом массиве методом конечных элементов и сопоставление полученных результатов с расчетом 2D-модели.

Материалы и методы

Объект исследования

Рассматриваемый объект представляет собой узел сопряжения вентиляционной шахты с перегонным тоннелем метрополитена в месте начала щитовой проходки (рис. 1). Ствол шахты выполнен с обделкой наружным диаметром 8,5 м. Размеры обделки обусловлены тем,

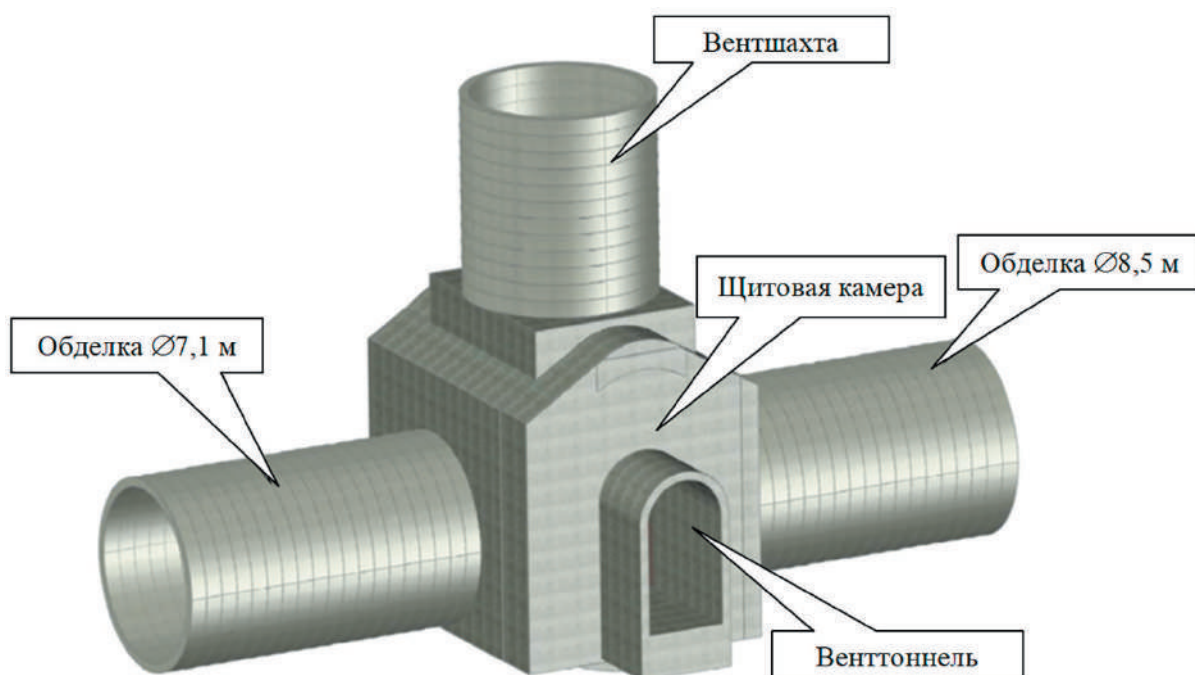


Рис. 1. Схема сопряжения шахты и перегонного тоннеля

что для начала щитовой проходки по стволу осуществлялся спуск элементов ТПК в щитовую камеру, которая размещена непосредственно под стволом шахты. Таким образом, с одной стороны к щитовой камере примыкает обделка из железобетонных тубингов диаметром 8,5 м, а с другой стороны — обделка новой трассы, выполненная из высокоточных блоков диаметром 7,1 м.

Перед пуском в эксплуатацию перегонного тоннеля шахта была переоборудована в вентиляционную. Для этого в монтажной камере возвели монолитную ограждающую конструкцию (тоннельную камеру), которая разделила внутренний объем монтажной камеры на два: зону движения поездов и вентиляционный канал (рис. 2).

Конструкция обделки шахты состоит из 67 железобетонных колец шириной 0,75 м (общая высота ствола ~ 50 м). Каждое кольцо со-

стоит из 15 железобетонных тубингов. Через каждые 10 колец за контуром обделки устроены опорные «башмаки» для предотвращения скольжения обделки по грунту.

В нижней части шахта сопряжена со щитовой камерой. Щитовая камера сооружалась горным способом в твердых протерозойских глинах с монолитной бетонной обделкой. Внутренние габариты камеры обусловлены размерами монтируемого щита и требованиями размещения подъемных и монтажных устройств и составляют ~ 11,5 × 13,5 × 15,5 м.

Проект капитального ремонта шахты предусматривает создание слоя из пеностеклобетона (рубашки), армированного циркониевой фиброй (рис. 3). Толщина рубашки (без учета заполнения тубингов) составляет 300 мм. Как было показано в [1], такая толщина пеностеклобетона обеспечивает теплоизоляцию грунтов в заобделочном пространстве в зимний

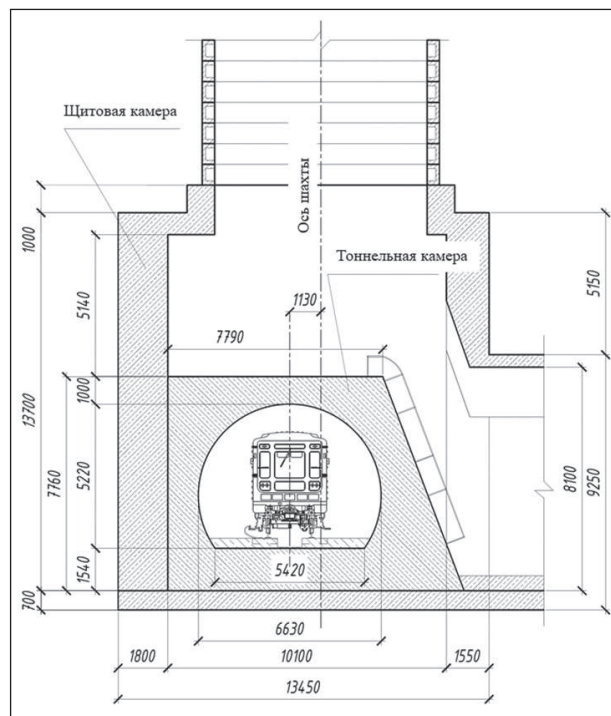


Рис. 2. Устройство тоннельной камеры внутри щитовой камеры

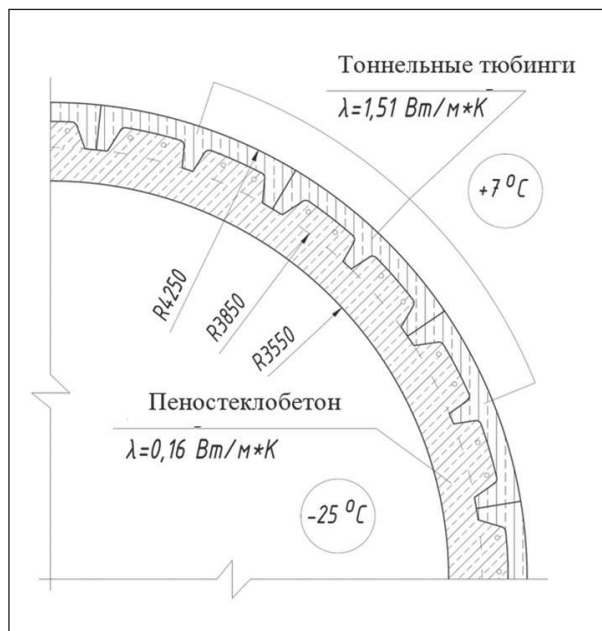


Рис. 3. Схема утепления с одновременным усилением обделки шахты слоем пеностеклобетона, армированного циркониевой фиброй

период эксплуатации шахты. Своим нижним торцом слой пеностеклобетона опирается на верхнюю часть тоннельной камеры.

Метод Метрогипротранса

Метод Метрогипротранса (другое название Hyperstatic Reaction Method, HRM) относится к классу численных методов анализа, в которых напряженное состояние обделки, представляемой в виде одномерных стержневых элементов, может быть определено через интегральные показатели. Метод Метрогипротранса доказал свою эффективность при расчете обделок тоннелей кругового [2, 4] и арочного очертания [5].

Подробно суть метода изложена в [2, 4]. Сплошная нейтральная ось обделки заменяется системой стержней, соединенных между собой в узлах. Граничные условия и нагрузки сосредотачиваются в узлах системы, таким образом, каждый узел находится в равновесии под воздействием усилий, возникающих в нем от узловых смещений $\square x_i$, $\square y_i$, $\square \varphi_i$ и узловых нагрузок p_i и q_i . В матричной форме уравнения метода принимают вид:

$$RV + P = 0, \quad (1)$$

где R — матрица реакций на единичные смещения узлов;

V — вектор узловых перемещений;

P — вектор реакций на заданные активные нагрузки.

В результате решения системы уравнений находят неизвестные перемещения узлов Δx_i , Δy_i , $\Delta \varphi_i$. Зная перемещения концов стержней, определяют внутренние усилия в стержнях: изгибающий момент в начале и в конце стержня, нормальные и поперечные силы.

Метод конечных элементов

Исследования выполнялись на численных моделях, построенных в расчетном комплек-

се Midas GTS NX, основанном на методе конечных элементов. Данный комплекс широко распространен в научной среде и применяется в расчетах сложных систем, таких как «фундамент — грунт» или «обделка — грунт», причем результаты математического моделирования в ряде исследований имели высокую сходимость с натурой [6–9].

Грунтовый массив и расположенная в нем конструкция разбиты на сеть объемных конечных элементов, соединенных между собой в узлах. На боковых границах массива установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений. Равномерно распределенная нагрузка, приложенная к верхней грани модели, определялась как вес вышележащих грунтов и составила:

$$q = \gamma H = 20 \cdot 50 = 1000 \text{ кПа},$$

где H — расстояние от верхней грани модели до «дневной поверхности», м (принята равной 50 м);

γ — средний объемный вес вышележащих грунтов, кН/м³ (принят равным 20 кН/м³).

Стадийность расчета задавалась включением в работу определенных конечных элементов, нагрузок или граничных условий.

На первом этапе расчета рассматривался однородный грунтовый массив для создания начального поля напряжений. При этом конечным элементам, моделирующим обделки, присваивались характеристики грунта. По результатам расчета первого этапа все перемещения обнулялись. На втором этапе расчета моделировалось сооружение шахты и щитовой камеры. На третьем этапе — сооружение тоннельной камеры внутри щитовой. На четвертом — устройство слоя пеностеклобетона (рубашки) внутри шахты путем передачи дополнительной нагрузки на верх тоннельной камеры.

Физико-механические характеристики грунтов и материалов

Для описания физико-механических свойств конечных элементов, моделирующих грунтовой массив, применялась модель Мора — Кулона. Приняты следующие характеристики, как для верхнекотлинских глин:

- секущий модуль упругости $E_{50} = 200$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$;
- объемный вес $\gamma = 21,5$ кН/м³;
- сцепление $C = 80$ кПа;
- угол внутреннего трения $\varphi = 23^\circ$.

Для описания физико-механических свойств конечных элементов, моделирующих обделки подземных сооружений, применялась линейно деформируемая модель. Сборная тубинговая обделка шахты моделировалась приведенными прямоугольными сечениями в соответствии с [10]. Характеристики материалов обделок приняты следующими:

- модули упругости тубинговой обделки шахты $E = 34\,500$ МПа и монолитной обделки камер $E = 30\,000$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$;
- объемный вес бетона $\gamma = 24,5$ кН/м³;
- расчетное сопротивление бетона монолитной обделки камер на сжатие – 14,5 МПа.

Пеностеклобетон в моделях не задавался в явном виде, а рассматривался в качестве дополнительной равномерно распределенной нагрузки.

Результаты

2D-модель

Обделка тоннельной камеры в плоской постановке была сведена к арке. Расчеты были выполнены в программном комплексе RK-6 (учебная версия). Построение расчетной схемы производилось на основе следующих допущений:

- плавное очертание нейтральной оси арки заменяется вписанным в нее стержневым многоугольником;

- жесткость арки на протяжении каждого стержня остается постоянной, но может меняться от стержня к стержню;
- граничные условия задачи представлены запретом вертикальных и горизонтальных перемещений пят арки, а также запретом их поворота;
- наличие примыкающей к арке стены щитовой камеры моделировалось запретом горизонтальных перемещений соответствующих узлов.

Расчетная схема представлена на рис.4 в виде несимметричной стержневой системы, состоящей из 17 узлов и 16 стержней.

Нагрузка от веса пеностеклобетона представлена равномерно распределенной нагрузкой, то есть $11,5 \cdot 60 \cdot 0,3 = 207$ кПа. Коэффициент 0,3 — это ширина полосы нагрузки, приложенной в плоскости модели (толщина слоя пеностеклобетона). Таким образом, в расчете рассмотрен случай, когда вся нагрузка от пеностеклобетона воспринимается верхом обделки тоннельной камеры. Суммарная расчетная вертикальная нагрузка определялась

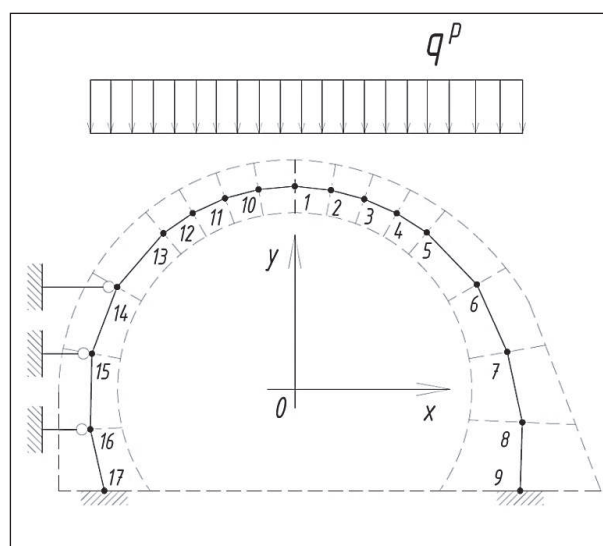


Рис. 4. Расчетная схема по методу Метрогипротранса

с учетом собственного веса свода арки и составила 231,5 кПа.

В результате расчета были определены усилия в сечениях конструкции: изгибающие моменты M и нормальные силы N (рис. 5).

Эксцентриситет приложения нормальной силы в четверти свода арки (в месте наибольшего значения изгибающего момента):

$$e_0 = M / N = 336,4 / 977,1 = 0,34 < 0,5 h.$$

Поскольку значение эксцентриситета меньше половины высоты расчетного сечения, равного $h = 1,4$ м, то прочность внецентренно сжатого бетонного элемента проверяется из условия:

$$N \leq m_1 \cdot \gamma_{b2} \cdot R_b \cdot b \cdot (h - 2e_0), \quad (2)$$

где m_1 — поправочный коэффициент, учитывающий неточность в назначении расчетной схемы, равный 0,9;

γ_{b2} — коэффициент условия работы, учитывающий длительное действие нагрузки, равный 0,9;

R_b — расчетное сопротивление бетона сжатию, МПа, равное 14500 кПа;

b и h — ширина и высота расчетного сечения, в нашем случае 1 м и 1,4 м соответственно.

Тогда

$$N = 977,1 \text{ кН} < 0,9 \cdot 0,9 \cdot 14500 \cdot 1 \times \\ \times (1,4 - 2 \cdot 0,34) = 8355,8 \text{ кН}.$$

Условие прочности выполнено с коэффициентом запаса 8,6.

3D-модель

Из опыта проектирования границы модели приняты на расстоянии двух пролетов щитовой камеры от края конструкции по ширине модели и одного пролета по глубине. Таким образом, размеры модели составили $\sim 50 \times 50 \times 30$ м. Узел сопряжения конструкций показан на рис. 6.

В расчете, так же как и в 2D-постановке, рассматривался случай полной передачи нагрузки от слоя пеностеклобетона на верхнюю часть тоннельной камеры, то есть $11,5 \cdot 60 = 690$ кПа. Тот же принцип был рассмотрен и в отношении нагрузки на свод щитовой камеры: полная передача нагрузки от веса тубингов шахты без учета частичной передачи нагрузки на грунт через

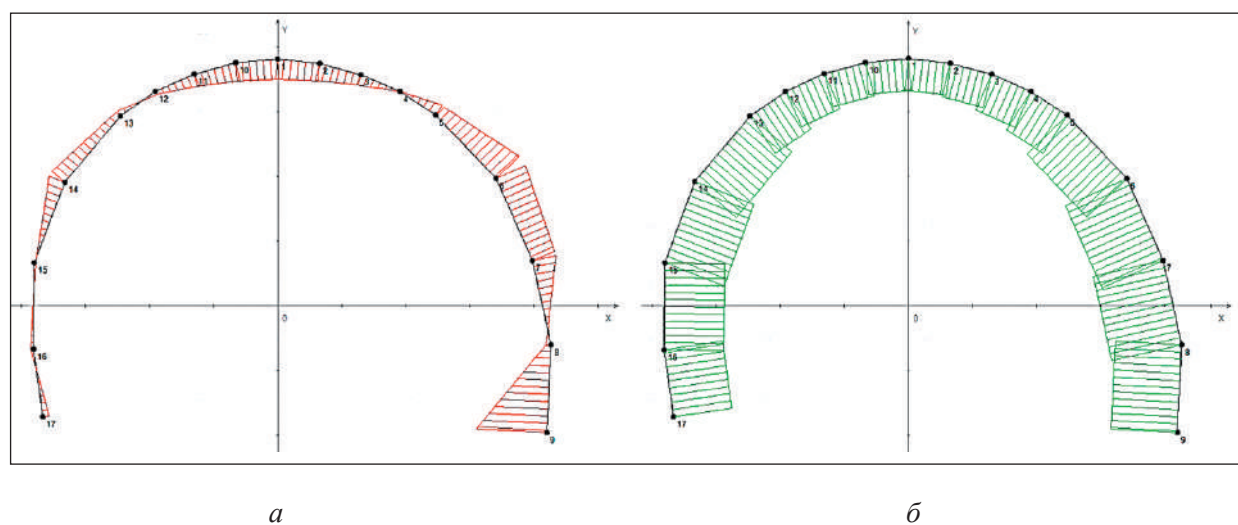


Рис. 5. Эпюры внутренних усилий: *a* — изгибающих моментов (максимальный момент в четверти свода 336,4 кНм); *б* — нормальных сил (максимальная нормальная сила в четверти свода 977,1 кН)

опорные башмаки, то есть $24,5 \cdot 50 = 1225$ кПа. Также к верхней грани обделки тоннельной камеры была приложена нагрузка от бетонного заполнения сзади слоя пеностеклобетона, принятая равной 150 кПа. Общая схема приложения нагрузки на обделку тоннельной камеры показана на рис. 7.

По результатам расчета были получены изополя напряжений в обделках по глобальной оси Z (максимальные вертикальные составляющие сжимающих и растягивающих напряжений). Максимальные напряжения в обделке щитовой камеры на третьем этапе расчета составили 13,79 МПа, а на четвертом — 13,83 МПа, то есть увеличились незначительно, на 0,3%, (рис. 8), и при этом не превысили предельно допустимых значений, равных 14,5 МПа (коэффициент запаса 1,05). Следует отметить, что

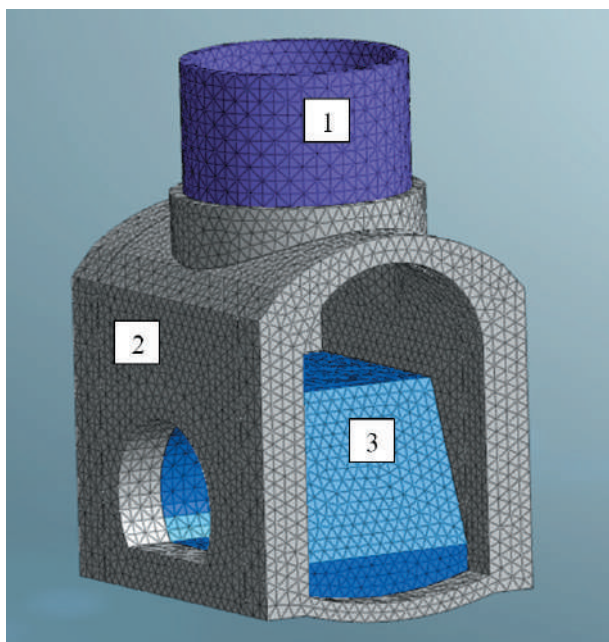


Рис. 6. Моделирование участка сопряжения шахты со щитовой камерой (грунтовый массив и передняя стена щитовой камеры не показаны): 1 — участок вентиляционной шахты, 2 — щитовая камера, 3 — тоннельная камера

эти напряжения зафиксированы в местах концентрации напряжений — в проеме перегонного тоннеля, а сжимающие напряжения в своде камеры не превышают значения 8,7 МПа (коэффициент запаса 1,7).

Максимальные сжимающие и растягивающие напряжения в обделке тоннельной камеры на третьем и четвертом этапе расчета поменяли места своих концентраций (рис. 9). Максимальные сжимающие напряжения на третьем этапе расчета составили 0,39 МПа, а на четвертом — 0,57 МПа при расчетном сопротивлении бетона на сжатие 14,5 МПа (коэффициент запаса 25); растягивающие напряжения на третьем этапе — 0,04 МПа, на четвертом — 0,10 МПа при расчетном сопротивлении бетона на растяжение 1,05 МПа (коэффициент запаса 10,5). То есть как по сжимающим, так и по растягивающим напряжениям в обделке путевой камеры имеется существенный запас по прочности.

Обсуждение / Анализ результатов

Метод Метрогипротранса и метод конечных элементов сложно сопоставить между собой, если рассматривается какая-то массивная

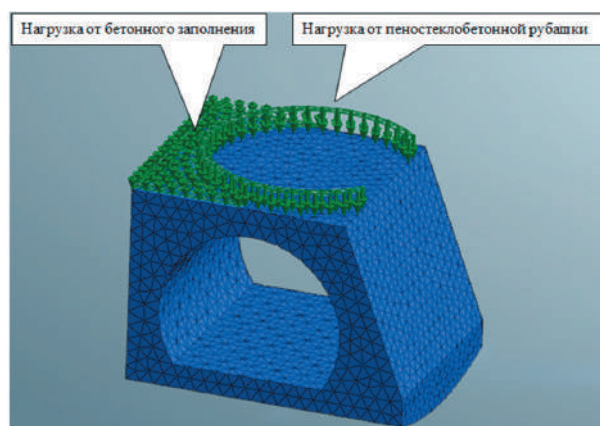


Рис. 7. Приложение нагрузки от пеностеклобетонной рубашки на верх тоннельной камеры

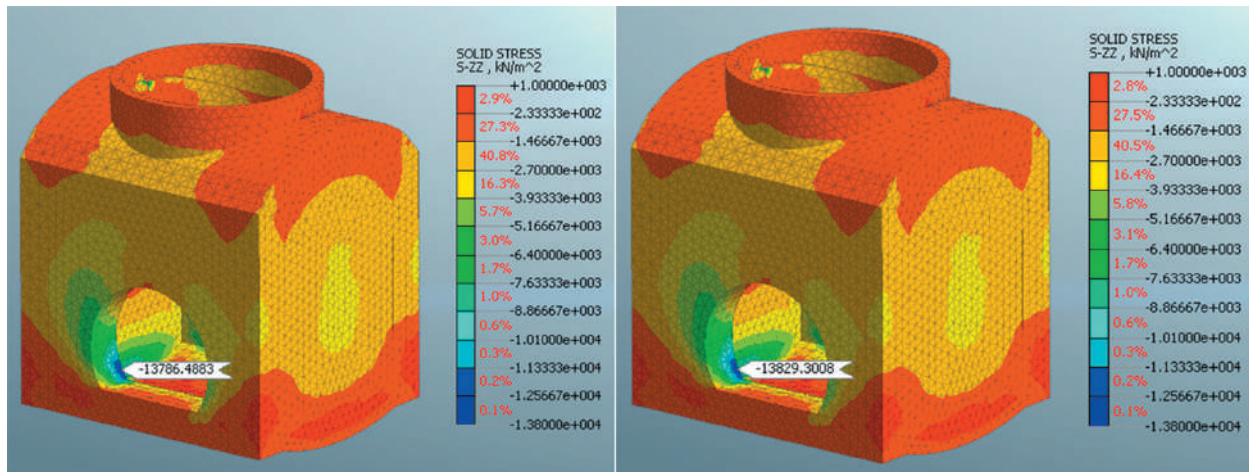


Рис. 8. Изополя напряжений в обделке щитовой камеры по глобальной оси Z на третьем и четвертом этапах расчета

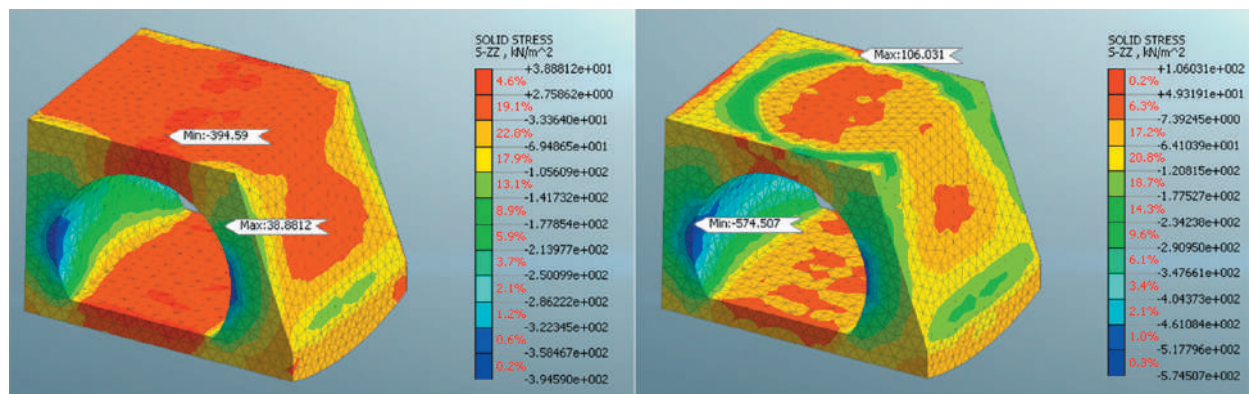


Рис. 9. Изополя напряжений в обделке тоннельной камеры по глобальной оси Z на третьем и четвертом этапах расчета

конструкция. Если такая конструкция имеет сложное очертание в пространстве, а нагрузка приложена к ней также по сложной траектории, то свести ее расчетную схему к плоской задаче становится затруднительным.

Тем не менее в рассмотренном случае пространственная конструкция тоннельной камеры с массивным сводом, стенами и лотковой плитой в первом приближении была сведена к арке. А нагрузка, приходящая на верхнюю часть камеры по круговой траектории, была представлена полосовой нагрузкой.

Результаты расчета по двум разным методикам можно сравнить косвенно — через коэффициенты запаса по несущей способности. И в этом случае результаты оказываются весьма близкими: 8,6 по методу Метрогипротранса и 10,5 по методу конечных элементов. Разница составляет 22%, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости методов расчета.

Необходимо отметить, что в мировой и отечественной практике отсутствует унифицированная шкала оценки сходимости инженерных расчетов. Имеются лишь данные

о расхождениях 2D/3D-моделирования тоннелей [11–14], достигающих 50%. Полученные в исследовании расхождения подтверждают целесообразность разработки практической шкалы верификации:

- 0–10% — высокая надежность;
- 10–25% — умеренная надежность;
- 25–50% — низкая надежность.

Исходя из предложенной шкалы оценки и полученных значений коэффициента запаса, полученные результаты можно признать надежными для практического инженерного анализа тоннельных конструкций при верификации программного обеспечения.

Заключение

1. В результате исследования статическая работа пространственной конструкции тоннельной камеры была сведена к работе плоской арки. Результатом такого представления явилась стержневая 2D-модель, в которой были определены внутренние усилия по методу Метрогипротранса и выполнен расчет для наиболее опасного сечения.

2. При расчете 3D-модели методом конечных элементов было зафиксировано перераспределение начальных напряжений в тоннельной камере. Косвенное сопоставление результатов расчета двух методов по коэффициентам запаса показал их удовлетворительную сходимость.

В целом установлено, что обделка тоннельной камеры воспринимает дополнительную нагрузку от бетонирования обоймы в шахте с большим запасом, даже с учетом полного веса пеностеклобетона (без учета трения по обделке шахты).

Список источников

1. Ventilation Shafts Freezing Protection Under the Influence of Negative Temperatures / E.G. Kozin

[et al.] // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of Transoilcold-2019*. 2020. Pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53

2. Analysis of Existing Technological Solutions of Foam Glass Production / G. V. Sopegin [et al.] // *Vestnik MGSU*. 2019. No. 14 (12). Pp. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609

3. Oreste P. A. Numerical Approach to the Hyperstatic Reaction Method for the Dimensioning of Tunnel Supports // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007. Vol. 22, iss. 2. Pp. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002

4. The Behaviour of the Segmental Tunnel Lining Studied by the Hyperstatic Reaction Method / N. A. Do [et al.] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014. Vol. 18, iss. 4. Pp. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583

5. Karasev M.A., Tien Tai Nguyen. Method for Predicting the Stress State of the Lining of Underground Structures of Quasi-Rectangular and Arched Forms // *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. Pp. 807–821. DOI: 10.31897/PMI.2022.17

6. Ledyayev A., Kavkazskij V., Davidenko E. Examination of the Stress-Strain State of Service Tunnels at the Airport “Domodedovo” // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 402. Springer, Cham, 2022. Pp. 28–37.

7. Construction Strategies for A NATM Tunnel in São Paulo, Brazil, in Residual Soil / P. M. Osvaldo [et al.] // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002

8. Shaposhnikov E.A., Frolov Yu. S. Substantiation of Rational Design Factors of a Metropolitan Railway Station Without Side Railway Platforms // *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023. Vol. 10, no. 1. DOI: 10.15862/05SATS123

9. Mechanical Performances of Shield Tunnel Segments Under Asymmetric Unloading Induced by Pit Excavation / Gang Wei [et al.] // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

2023. Vol. 15, iss. 6. Pp. 1547–1564. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010

10. Konkov A., Sokornov A., Korolev K. The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 402. Springer, Cham, 2022. Pp. 568–576.

11. Svoboda T. Comparison of Displacement Field Predicted by 2D and 3D Finite Element Modelling of Shallow NATM Tunnels in Clays // Geomechanics and Tunnelling. 2011. 29 p. DOI: 10.1002/geot.201000009

12. Maraš-Dragojević S. Use of Finite Element Method for 2D and 3D Analyses of Tunnelling Induced Settlements // Građevinar. 2020. No. 8. Pp. 673–680. DOI: 10.14256/JCE.2119.2017

13. Üçer S. Comparison of 2D and 3D Finite Element Models of Tunnel Advance in Soft Ground: A Case Study on Bolu Tunnels. Ankara: Middle East Technical University, 2006. 116 p.

14. Behavior of the Vault in Column-Free Large-Span Metro Stations Under Asymmetric Loading / J.-L. Zhang [et al.] // Appl. Sci. 2025. No. 15 (20). P. 10944.

Дата поступления: 05.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — кандидат техн. наук, доцент; anlonkov@pgupstm.ru

Stress-Strain State of the Tunnel Chamber After Renovation of the Ventilation Shaft

A. A. Sokornov, A. N. Kon'kov

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

For citation: Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Stress-Strain State of the Tunnel Chamber After Renovation of the Ventilation Shaft // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 462–472. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-462-472 (In Russian)

Abstract

Objective: to evaluate changes in the stress-strain state of the chamber tunnel lining located under the ventilation shaft and experiencing the pressure of foam-reinforced concrete, a layer of structural reinforcement and insulation of the shaft. **Methods:** the study was performed in two- and three-dimensional formulations using different methods – the Hyperstatic Reaction Method (HRM) and the finite element method. The calculation results were compared with each other through the corresponding coefficients of the bearing capacity of the tunnel chamber lining. As a result of the study, satisfactory convergence of calculation methods with each other was found. **Practical significance:** the results of the study can be used to calculate complex spatial structures, the work of which can be reduced to arches.

Keywords: tunnel, lining, mathematical modeling, finite element method, hyperstatic reaction method

References

1. Kozin E.G., et al. Ventilation Shafts Freezing Protection Under the Influence of Negative Temperatures, *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of Transoilcold-2019*, 2020, pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53
2. Sopegin G.V., et al. Analysis of Existing Technological Solutions of Foam Glass Production, *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 2019, no. 14 (12), pp. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609
3. Oreste P. A Numerical Approach to the Hyperstatic Reaction Method for the Dimensioning of Tunnel Supports, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, vol. 22, iss. 2, pp. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002
4. Do N.A., et al. The Behaviour of the Segmental Tunnel Lining Studied by the Hyperstatic Reaction Method, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2014, vol. 18, iss. 4, pp. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583
5. Karasev M.A., Tien Tai Nguyen. Method for Predicting the Stress State of the Lining of Underground Structures of Quasi-Rectangular and Arched Forms, *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 257, pp. 807–821. DOI: 10.31897/PMI.2022.17
6. Ledyayev A., Kavkazskij V., Davidenko E. Examination of the Stress-Strain State of Service Tunnels at the Airport “Domodedovo”, *International Scientific Siberian Transport Forum Transsiberia-2021, Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 402, Springer, Cham, 2022, pp. 28–37.
7. P. M. Osvaldo, et al. Construction Strategies for A NATM Tunnel in São Paulo, Brazil, In Residual Soil, *Underground Space*, 2022, vol. 7, iss. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.
8. Shaposhnikov E.A., Frolov Yu. S. Substantiation of Rational Design Factors of a Metropolitan Railway Station Without Side Railway Platforms, *Russian Journal of Transport Engineering*, 2023, vol. 10, no. 1. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123
9. Gang Wei, et al. Mechanical Performances of Shield Tunnel Segments Under Asymmetric Unloading Induced by Pit Excavation, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, vol. 15, iss. 6, pp. 1547–1564. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010
10. Kon'kov A., Sokornov A., Korolev K. The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections, *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 402, Springer, Cham, 2022, pp. 568–576.
11. Svoboda T. Comparison of Displacement Field Predicted by 2D and 3D Finite Element Modelling of Shallow NATM Tunnels in Clays, *Geomechanics and Tunnelling*, 2011, 29 p. URL: <https://web.natur.cuni.cz/uhigug/masin/download/SM-Geotechnik2011-pp.pdf>, DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201000009>
12. Maraš-Dragojević S. Use of Finite Element Method for 2D And 3D Analyses of Tunnelling Induced Settlements, *Građevinar*, 2020, no. 8, pp. 673–680. DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.2119.2017>
13. Ůčer S. Comparison of 2D and 3D Finite Element Models of Tunnel Advance in Soft Ground: A Case Study on Bolu Tunnels, *Ankara: Middle East Technical University*, 2006, 116 p. URL: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12607172/index.pdf> (дата обращения: 11.02.2026).
14. Zhang J.-L., et al. Behavior of the Vault in Column-Free Large-Span Metro Stations Under Asymmetric Loading, *Appl. Sci.*, 2025, no. 15 (20), 10944.

Received: February 05, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

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

Alexandr N. KON'KOV – PhD in Engineering,
Associate Professor; ankonkov@pgupstm.ru

УДК 624.21.055:693.5

Анализ современной нормативной базы по проектированию железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды

С. С. Салиханов¹, Э. С. Карапетов²

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан, 100167, Ташкент, ул. Темирйулчилар, 1

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

Для цитирования: Салиханов С. С., Карапетов Э. С. Анализ современной нормативной базы по проектированию железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 473–482. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-473-482

Аннотация

Цель: выполнить расширенный сравнительный анализ современной нормативной базы проектирования железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды, включая стандарты EN 206 и Eurocode 2, AASHTO LRFD, национальные нормы России и Узбекистана, а также нормативные документы стран Азиатско-Тихоокеанского региона (Япония, Китай, Индия, Австралия, Новая Зеландия). Определить особенности методологических подходов к обеспечению долговечности мостовых сооружений и выявить направления совершенствования нормативных требований в условиях перехода к проектированию по сроку службы и управлению жизненным циклом конструкций. **Методы:** проведен сравнительный анализ международных и национальных нормативных документов по критериям учета воздействия окружающей среды, назначения, проектного срока службы, применения моделей деградации, вероятностной оценки надежности и интеграции методов Life-Cycle Cost (LCC) и Life-Cycle Assessment (LCA). Выполнен системный анализ нормативных подходов стран Европы, Северной Америки и Азиатско-Тихоокеанского региона с позиций устойчивого проектирования. **Результаты:** установлено, что международные нормативные системы предусматривают количественное проектирование долговечности с использованием математических моделей карбонизации и хлоридной диффузии, вероятностных методов оценки надежности и цифровых технологий управления жизненным циклом мостов. Нормативные документы стран АТР демонстрируют активный переход к Performance-Based Design и интеграции экологических показателей в проектные процедуры. Выявлено, что действующие нормативы СП 35.13330.2011 и ШНК 2.05.03-22 обеспечивают нормативную долговечность конструкций, однако не содержат формализованных моделей прогнозирования ресурса и количественной оценки экологической эффективности. Обоснованы направления совершенствования отечественной нормативной базы на основе принципов Service Life Design и Life-Cycle Design. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при актуализации национальных нормативных документов, разработке методик расчета долговечности железобетонных мостов и внедрении устойчивых проектных решений. Предложенные подходы способствуют повышению достоверности прогноза ресурса, оптимизации затрат жизненного цикла и снижению экологического воздействия мостовых сооружений.

Ключевые слова: железобетонные мосты, нормативная база, долговечность, проектирование по сроку службы, Service Life Design, Life-Cycle Design, карбонизация, хлоридная коррозия, остаточный ресурс, экологическая эффективность, AASHTO, EN 206, JSCE, GB 50010, AS 5100, устойчивое проектирование

Введение

Современное развитие транспортной инфраструктуры требует перехода от традиционного расчета мостов по критериям прочности и устойчивости к методологии проектирования, в которой долговечность, надежность, экологическая эффективность и жизненный цикл сооружения рассматриваются как взаимосвязанные параметры единой инженерной системы [1–5].

В условиях изменения климата, роста транспортных нагрузок и ужесточения требований устойчивого развития возрастает необходимость количественного учета деградационных процессов бетона и арматуры, а также интеграции экологических показателей в процедуру проектирования [6–7].

Целью настоящего исследования являются сравнительный анализ современной нормативной базы различных стран по проектированию железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды и выявление методологических направлений совершенствования отечественных нормативных документов в контексте перехода к Service Life Design (проектирование срока службы) и Life-Cycle Design (проектирование жизненного цикла).

Основная часть

При рассмотрении эволюции нормативных подходов в историческом разрезе наблюдается, что нормы проектирования мостов формировались как детерминированные системы, ориентированные на обеспечение запаса прочности. Однако в последние десятилетия в развитых странах происходит переход к Performance-Based Design (дизайн на основе производительности), где долговечность рассматривается как проектируемый параметр [1–4].

При этом основными тенденциями являются назначение проектного срока службы (50–120 лет) [1–3], использование моделей деградации (карбонизация, хлоридная коррозия) [9, 34, 39], вероятностная оценка надежности [4, 37], интеграция LCC (Life Cycle Cost — стоимость жизненного цикла) и LCA (Life Cycle Assessment — оценка жизненного цикла) [6, 7, 12], а также цифровизация проектирования и управления мостами [8]. Проведем сравнительный анализ современной нормативной базы различных стран по проектированию железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды.

При анализе **Европейской нормативной системы EN 206 и Eurocode 2** видно, что Стандарт EN 206:2023 и Eurocode 2 устанавливают систему классов воздействия (XC, XD, XS, XF, XA, XM) и связывают их с параметрами состава бетона и защитного слоя [1, 2].

Особенностями Европейской системы являются следующие тенденции:

- количественная связь W/C (водоцементное отношение) и долговечности;
- проектирование на срок 50, 75, 100 лет;
- возможность применения диффузионных моделей;
- интеграции этих нормативных систем с ISO 15686 (Service Life Planning).

Кроме этого, Европейская система формирует модельный подход к долговечности [9, 40].

Американская нормативная система AASHTO LRFD использует вероятностную модель предельных состояний во времени [10].

Ключевыми положениями американской системы являются:

- применение калиброванных коэффициентов надежности;
- учет коррозии арматуры;
- Life-Cycle Cost Analysis (анализ стоимости жизненного цикла);

- управление мостами через DOT и FHWA¹. Американский подход основан на принципах структурной надежности [4] и активно использует Life-Cycle Cost Analysis [12].

При этом системы мониторинга мостов DOT и FHWA обеспечивают интеграцию расчетных моделей и эксплуатации [11].

При анализе нормативов стран Азиатско-Тихоокеанского региона по проектированию железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды видим, что японские нормы **JSCE Standard Specifications for Concrete Structures** ориентированы на Performance-Based Design [13, 14].

Особенностями японских норм JSCE являются:

- интеграция долговечности и сейсмостойкости;
- прогноз карбонизации и хлоридной диффузии;
- обязательная стратегия инспекций;
- срок службы 100 лет и более.

Китайская нормативная система (GB 50010, GB/T 50476) [15–17] предусматривает:

- назначение срока службы 50–100 лет;
- региональную калибровку коэффициентов деградации;
- моделирование проникновения хлоридов;
- активное внедрение BIM.

Индийский стандарт (IRC 112) учитывает тропический климат и прибрежные зоны [18, 19]. Исходя из этого, к железобетонным мостовым сооружениям предъявляются усиленные требования к защитному слою; обязательный учет хлоридной агрессии; а также адаптация к высоким температурам.

¹DOT — Department of Transport, Министерство Транспорта США; FHWA — Federal Highway Administration, Федеральное управление автомобильных дорог, подразделение Министерства транспорта США в области управления и развития федеральных автомобильных дорог и мостов.

Австралийские нормы (AS 5100) предусматривают следующие требования к железобетонным мостовым сооружениям:

- проектный срок службы 100 лет [20,21];
- анализ долговечности как обязательный этап;
- связь с устойчивым развитием;
- учет экстремальных климатических воздействий.

Норматив Новой Зеландии (NZTA Bridge Manual) [22,23] ориентирован на прогноз остаточного ресурса, интеграцию мониторинга, сочетание долговечности и сейсмостойкости.

Российская и узбекистанская нормативные базы СП 35.13330.2011 и ШНК 2.05.03-22 обеспечивают нормативную долговечность конструкций [24, 29], однако не содержат формализованных моделей деградации.

В работах Э. С. Карапетова [30, 31] показана возможность прогнозирования срока службы железобетонных мостов на основе моделей карбонизации защитного слоя.

В исследованиях С. С. Салиханова разработаны расчетные модели взаимодействия железобетонных мостовых конструкций с окружающей средой [32] и выполнен анализ влияния климатических факторов на их работу [33], что подтверждает необходимость нормативного закрепления количественного расчета долговечности.

Сравнительный анализ нормативных систем

Анализ полученных данных в табл. 1 и 2 демонстрирует, что ЕС, США и страны АТР используют модели деградации [1, 10, 15], внедряют LCC и LCA [6, 12]; интегрируют BIM и цифровые технологии [8].

При этом видим, что национальные нормативы стран СНГ сохраняют преимущественно детерминированный характер.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительная характеристика нормативных систем проектирования железобетонных мостовых сооружений с учетом воздействия окружающей среды

Показатель	EN 206 / Eurocode	AASHTO LRFD	СП 35.13330.2011	ШНК 2.05.03-22
Подход к долговечности	Service Life Design, проектирование по сроку службы	Вероятностный подход, Life-Cycle Design	Детерминированный подход на основе коэффициентов надежности и требований долговечности	Коэффициенты условий эксплуатации и категорий среды
Учет воздействия окружающей среды	Классы воздействия (XC, XD, XS, XF, XA, XM)	Категории коррозионной агрессивности и эксплуатационных условий	Учет климатических районов, агрессивных сред, требований к защитному слою и маркам бетона	Агрессивные зоны по СНиП 2.03.11-85 и категориям эксплуатации
Модели деградации	Диффузионные модели карбонизации и проникновения хлоридов	Вероятностные модели усталости, коррозии и деградации	Прямые модели деградации не регламентированы, учитываются косвенно через нормативные требования	Математические модели деградации отсутствуют, используются нормативные параметры долговечности
Проектный срок службы	50, 75, 100 и более лет	75–120 лет	50–100 лет в зависимости от категории сооружения	50–75 лет
Учет жизненного цикла (LCC)	Предусмотрен (LCA, LCC, Service Life Planning)	Предусмотрен (Life-Cycle Cost Analysis)	Частично учитывается при выборе конструктивных решений и материалов	Ограниченно учитывается
Учет экологичности	Учитывается (углеродный след, устойчивое проектирование, экологические классы)	Учитывается при выборе материалов и проектных решений	Прямой экологический анализ не регламентирован	Не регламентирован
ВМ-интеграция	Предусмотрена и активно развивается (Eurocode, ISO 19650)	Активно внедряется в практике DOT и FHWA	Находится на стадии внедрения, нормативно не регламентирована напрямую	Отсутствует

ТАБЛИЦА 2. Сравнение мировых подходов к проектированию по сроку службы

Регион	Service Life Design	Модели деградации	LCC	Экология	ВМ
ЕС	Да	Диффузионные	Да	Да	Да
США	Да	Вероятностные	Да	Частично	Да
Япония	Да	Да	Частично	Да	Да
Китай	Да	Да	Частично	Частично	Да
Австралия	Да	Да	Да	Да	Да
Россия	Частично	Нет	Ограниченно	Нет	Частично
Узбекистан	Ограниченно	Нет	Нет	Нет	Нет

На основе анализа имеющихся данных для совершенствования национальных нормативов стран СНГ и в целях их адаптации к европейским, американским, стран Азиатско-Тихоокеанского региона нормативным системам проектирования железобетонных мостовых сооружений с учетом воздействия окружающей среды, а также подходам к проектированию по сроку службы можно предложить следующие методологические направления:

1. Введение обязательного расчета долговечности.
2. Разработка регионально-калиброванных моделей деградации [34–39].
3. Интеграция экологических показателей (LCA) [6, 7].
4. Внедрение LCC в нормативную практику [12].
5. Интеграция BIM и цифровых двойников [8].
6. Формализация расчета остаточного ресурса на стадии проектирования.

Устойчивое проектирование мостовых сооружений должно базироваться на концептуальной модели интеграции долговечности, ресурса и экологии (рисунок). При этом интеграционная оценка объединяет в себе механическую надежность конструкции во времени [4]; моделирование физико-химической деградации материалов [34–39]; экономическую эффективность на протяжении жизненного цикла (LCC) [12]; экологические показатели, включая углеродный след (LCA) [6].

Рисунок иллюстрирует концептуальную модель устойчивого проектирования, в которой долговечность выступает системообразующим параметром, связывающим оценку надежности, остаточного ресурса и экологической эффективности в рамках полного жизненного цикла сооружения.



Рисунок. Интеграция «Долговечность — Ресурс — Экология — Жизненный цикл»

Выводы

В статье выполнен расширенный сравнительный анализ современной нормативной базы проектирования железобетонных мостов с учетом воздействия окружающей среды, включая стандарты EN 206 и Eurocode 2, AASHTO LRFD, национальные нормы России и Узбекистана, а также нормативные документы стран Азиатско-Тихоокеанского региона (Япония, Китай, Индия, Австралия, Новая Зеландия).

Данный анализ позволил определить особенности методологических подходов к обеспечению долговечности железобетонных мостовых сооружений и выявить направления совершенствования нормативных требований в условиях перехода к проектированию по сроку службы и управлению жизненным циклом конструкций.

Таким образом, цель исследования достигнута, а выводы могут быть сведены к следующим:

1. Международные нормативные системы перешли к проектированию по сроку службы [1–4].

2. Страны ЕС, США и АТР используют количественные модели деградации [9, 15, 34].

3. СП 35.13330.2011 и ШНК 2.05.03-22 обеспечивают безопасность, но не формализуют расчет долговечности [24, 29].

4. Работы соавторов настоящей статьи Э. С. Карапетова и С. С. Салиханова подтверждают возможность интеграции моделей деградации в нормативную практику [30–33].

5. Перспективой исследования является интеграция надежности, ресурса и экологической эффективности в рамках полного жизненного цикла мостов.

Список источников

1. EN 206:2023. Concrete — Specification, performance, production and conformity. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2023. 128 p.
2. EN 1992-1-1:2004+A1:2014. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: CEN, 2014. 225 p.
3. ISO 15686-1:2022. Buildings and Constructed Assets. Service Life Planning. Part 1: General Principles. Geneva: ISO, 2022. 40 p.
4. ISO 2394:2015. General Principles on Reliability for Structures. Geneva: ISO, 2015. 111 p.
5. ISO 13823:2008. General Principles on the Design of Structures for Durability. Geneva: ISO, 2008. 22 p.
6. ISO 14040:2006. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework. Geneva: ISO, 2006. 20 p.
7. ISO 14044:2006. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines. Geneva: ISO, 2006. 46 p.
8. ISO 19650-1:2018. Organization and Digitization of Information About Buildings and Civil Engineering Works — Information Management Using BIM. Geneva: ISO, 2018. 44 p.
9. FIB Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: Fédération Internationale du Béton (FIB), 2013. 434 p.
10. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 9th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020. 1800 p.
11. FHWA. Bridge Preservation Guide. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2018. 220 p.
12. Stewart M.G. Life-Cycle Cost Analysis of Corrosion Damage in Reinforced Concrete Bridges // Engineering Structures. 2004. Vol. 26. Pp. 963–973.
13. JSCE. Standard Specifications for Concrete Structures, 2017. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2017. 356 p.
14. Nishida T. Durability design of concrete structures in Japan // Structural Concrete. 2018. Vol. 19. Pp. 1253–1262.
15. GB 50010-2010. Code for Design of Concrete Structures. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC, 2010. 398 p.
16. GB/T 50476-2019. Code for Durability Design of Concrete Structures. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. 215 p.
17. Zhang Y., Li C. Service Life Prediction of Concrete Bridges in China // Engineering Structures. 2021. Vol. 232. P. 111845.
18. IRC 112:2011. Code of Practice for Concrete Road Bridges. New Delhi: Indian Roads Congress, 2011. 214 p.
19. Mehta P.K., Monteiro P.J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 704 p.
20. AS 5100-2017. Bridge Design. Sydney: Standards Australia, 2017. 950 p.
21. Austroads. Guide to Bridge Technology. Sydney: Austroads Ltd., 2018. 310 p.
22. NZTA Bridge Manual. Wellington: New Zealand Transport Agency, 2020. 420 p.
23. New Zealand Transport Agency. Durability Planning Guidelines for Bridges. Wellington, 2019. 150 p.
24. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. М.: Минрегион России, 2011. 178 с.

25. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 168 с.
26. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. М.: Стандартинформ, 2017. 48 с.
27. Васильев В.Ю., Киселев А.А. Долговечность железобетонных конструкций транспортных сооружений: монография. М.: Транспорт, 2018. 312 с.
28. Соловьев К.Н., Агафонов С.И. Расчет железобетонных мостов по критерию срока службы // Мосты и тоннели. 2022. № 2. С. 21–29.
29. ШНК 2.05.03-22. Мосты и трубы. Нормы проектирования. Ташкент: Госкомархстрой РУз, 2022. 96 с.
30. Карапетов Э.С., Шестовицкий Д.А. Прогноз срока службы железобетонных мостов на основе модели процесса карбонизации защитного слоя // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. № 1 (46). С. 52–60.
31. Карапетов Э.С., Белый А.А. Эксплуатационная надежность мостовых сооружений в суровых климатических условиях // Путьовой Навигатор. 2020. № 43 (69). С. 54–59.
32. Салиханов С.С. Расчетные модели и уравнения взаимодействия железобетонных мостовых конструкций с окружающей средой // Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации. 2025. № 4. С. 113–120.
33. Салиханов С.С. Влияние факторов окружающей среды на работу железобетонных мостовых конструкций // Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации. 2025. № 4. С. 127–130.
34. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 469 p.
35. Papadakis V.G. Effect of Carbonation on Concrete Durability // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Pp. 291–299.
36. Andrade C., Alonso C. Corrosion Rate Monitoring in Concrete Structures // Construction and Building Materials. 2004. Vol. 18. Pp. 567–573.
37. Bastidas-Arteaga E., Stewart M.G. Reliability of Reinforced Concrete Structures Subjected to Chloride Ingress // Structural Safety. 2015. Vol. 56. Pp. 13–22.
38. Biondini F., Frangopol D.M. Life-Cycle Performance of Reinforced Concrete Bridges // Journal of Structural Engineering. 2014. Vol. 140 (3). P. 04013060.
39. Tang L., Nilsson L.O. Chloride Diffusion Modelling of Concrete // Cement and Concrete Research. 1992. Vol. 22. Pp. 673–684.
40. DuraCrete. Probabilistic Performance-based Durability Design of Concrete Structures. Brussels: EU Brite-Euram Project Report, 2000. 350 p.

Дата поступления: 19.03.2026

Решение о публикации: 26.04.2026

Сведения об авторах

САЛИХАНОВ Саидхон Салиханович — кандидат техн. наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели», Ташкентский государственный транспортный университет; saidkhansalikhanov@gmail.com

КАРАПЕТОВ Эдуард Степанович — кандидат техн. наук, профессор кафедры «Мосты», Петербургский государственный университет путей сообщения; eskar@yandex.ru

Analysis of the Modern Regulatory Framework for the Design of Reinforced Concrete Bridges Considering Environmental Impact

S. S. Salikhanov¹, E. S. Karapetov²

¹Tashkent State Transport University, 1 Temiryulchilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan

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

For citation: *Salikhanov S. S., Karapetov E. S. Analysis of the Modern Regulatory Framework for the Design of Reinforced Concrete Bridges Considering Environmental Impact // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 473–482. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-473-482 (In Russian)*

Abstract

Objective: to perform an extended comparative analysis of the modern regulatory framework governing the design of reinforced concrete bridges considering environmental impact, including EN 206 and Eurocode 2, AASHTO LRFD, national standards of Russia and Uzbekistan, as well as regulatory documents of the Asia-Pacific region (Japan, China, India, Australia, and New Zealand). The study aims to identify the specific features of methodological approaches to ensuring bridge durability and to determine directions for improving regulatory requirements under the transition to service life design and life-cycle management of structures.

Methods: a comparative analysis of international and national regulatory documents was conducted based on criteria including environmental exposure consideration, design service life specification, application of degradation models, probabilistic reliability assessment, and integration of Life-Cycle Cost (LCC) and Life-Cycle Assessment (LCA) methods. A systematic analysis of regulatory approaches in Europe, North America, and the Asia-Pacific region was carried out from the perspective of sustainable design. **Results:** it was established that international regulatory systems provide for quantitative durability design using mathematical models of carbonation and chloride diffusion, probabilistic reliability methods, and digital technologies for bridge life-cycle management. Regulatory documents of the Asia-Pacific region demonstrate an active transition toward performance-based design and the integration of environmental indicators into design procedures. It was found that the current Russian standard SP 35.13330.2011 and the Uzbek standard SHNK 2.05.03-22 ensure normative durability of structures; however, they do not include formalized service life prediction models or quantitative environmental performance assessment. Directions for improving the national regulatory framework are substantiated based on the principles of Service Life Design and Life-Cycle Design. **Practical significance:** the obtained results may be applied in updating national regulatory documents, developing durability assessment methodologies for reinforced concrete bridges, and implementing sustainable design solutions. The proposed approaches improve the reliability of service life prediction, optimize life-cycle costs, and reduce the environmental impact of bridge structures.

Keywords: reinforced concrete bridges, regulatory framework, durability, service life design, Service Life Design, Life-Cycle Design, carbonation, chloride corrosion, residual service life, environmental efficiency, AASHTO, EN 206, JSCE, GB 50010, AS 5100, sustainable design

References

1. EN 206:2023. Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity, Brussels, European Committee for Standardization (CEN), 2023, 128 p.
2. EN 1992-1-1:2004+A1:2014. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-1, General Rules and Rules for Buildings, Brussels, CEN, 2014, 225 p.
3. ISO 15686-1:2022. Buildings and Constructed Assets — Service Life Planning, Part 1, General Principles, Geneva, ISO, 2022, 40 p.
4. ISO 2394:2015. General Principles on Reliability for Structures, Geneva, ISO, 2015, 111 p.

5. ISO 13823:2008. General Principles on the Design of Structures for Durability, Geneva, ISO, 2008, 22 p.
6. ISO 14040:2006. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework, Geneva, ISO, 2006, 20 p.
7. ISO 14044:2006. Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines, Geneva, ISO, 2006, 46 p.
8. ISO 19650-1:2018. Organization and Digitization of Information About Buildings and Civil Engineering Works — Information Management Using BIM, Geneva, ISO, 2018, 44 p.
9. FIB Model Code for Concrete Structures 2010, Lausanne: Fédération Internationale du Béton (FIB), 2013, 434 p.
10. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 9th ed., Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020, 1800 p.
11. FHWA. Bridge Preservation Guide, Washington, DC, Federal Highway Administration, 2018, 220 p.
12. Stewart M.G. Life-Cycle Cost Analysis of Corrosion Damage in Reinforced Concrete Bridges, *Engineering Structures*, 2004, vol. 26, pp. 963–973.
13. JSCE. Standard Specifications for Concrete Structures — 2017, Tokyo, *Japan Society of Civil Engineers*, 2017, 356 p.
14. Nishida T. Durability Design of Concrete Structures in Japan, *Structural Concrete*, 2018, vol. 19, pp. 1253–1262.
15. GB 50010-2010. Code for Design of Concrete Structures, Beijing, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC, 2010, 398 p.
16. GB/T 50476-2019. Code for Durability Design of Concrete Structures, Beijing, China Architecture & Building Press, 2019, 215 p.
17. Zhang Y., Li C. Service Life Prediction of Concrete Bridges in China, *Engineering Structures*, 2021, vol. 232, 111845.
18. IRC 112:2011. Code of Practice for Concrete Road Bridges, New Delhi: Indian Roads Congress, 2011, 214 p.
19. Mehta P.K., Monteiro P.J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 4th ed., New York, McGraw-Hill, 2014, 704 p.
20. AS 5100-2017. Bridge Design, Sydney: Standards Australia, 2017, 950 p.
21. Austroads. Guide to Bridge Technology, Sydney: Austroads Ltd., 2018, 310 p.
22. NZTA Bridge Manual, Wellington, New Zealand Transport Agency, 2020, 420 p.
23. New Zealand Transport Agency. Durability Planning Guidelines for Bridges, Wellington, 2019, 150 p.
24. SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.05.03–84 [Bridges and Pipes. Updated version of SNIp 2.05.03–84], Moscow: Minregion Rossii [Ministry of Regional Development of the Russian Federation], 2011, 178 p. (In Russian)
25. SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya [Concrete and Reinforced Concrete Structures. The Main Provisions], Moscow, Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation], 2018, 168 p. (In Russian)
26. GOST 31384-2017. Zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy ot korrozii [Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures from Corrosion], Moscow, Standartinform, 2017, 48 p. (In Russian)
27. Vasil'ev V. Yu., Kiselev A.A. Dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruksiy transportnykh so-ruzheniy: monografiya [Durability of Reinforced Concrete Structures of Transport Facilities: Monograph], Moscow, Transport, 2018, 312 p. (In Russian)
28. Solov'ev K. N., Agafonov S.I. Raschet zhelezobetonnykh mostov po kriteriyu sroka sluzhby [Calculation of Reinforced Concrete Bridges by the Criterion of Service Life], *Mosty i tonneli [Bridges and Tunnels]*, 2022, no. 2, pp. 21–29. (In Russian)
29. ShNK 2.05.03-22. Mosty i truby. Normy proektirovaniya [Bridges and Pipes. Design Standards], Tashkent, Goskomarkhstroï Ruz [The State Committee

of the Republic of Uzbekistan for Architecture and Construction], 2022, 96 p. (In Russian)

30. Karapetov E.S., Shestovitskij D.A. Prognoz sroka sluzhby zhelezobetonnykh mostov na osnove modeli protsessa karbonizatsii zashchitnogo sloya [Forecast of the Service Life of Reinforced Concrete Bridges Based on the Carbonation Process Model of the Protective Layer], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, 2016, no. 1 (46), pp. 52–60. (In Russian)

31. Karapetov E.S., Belyj A.A. Eksploatatsionnaya nadezhnost' mostovykh sooruzhenij v surovyyh klimaticheskikh usloviyakh [Operational Reliability of Bridge Structures in Harsh Climatic Conditions], *Putevoj Navigator [Path Navigator]*, 2020, № 43 (69), pp. 54–59. (In Russian)

32. Salikhanov S.S. Raschetnye modeli i uravneniya vzaimodeystviya zhelezobetonnykh mostovykh konstruktsiy s okruzhayushchey sredoy [Computational Models and Equations of Interaction of Reinforced Concrete Bridge Structures with the Environment], *Zheleznodorozhnyy transport: aktual'nye zadachi i innovatsii [Railway Transport: Current Challenges and Innovations]*, 2025, no. 4, pp. 113–120. (In Russian)

33. Salikhanov S.S. Vliyaniye faktorov okruzhayushchey sredy na rabotu zhelezobetonnykh mostovykh konstruktsiy [Influence of Environmental Factors on the Operation of Reinforced Concrete Bridge Structures], *Zheleznodorozhnyy transport: aktual'nye zadachi i innovatsii [Railway Transport: Current Challenges and Innovations]*, 2025, no. 4, pp. 127–130. (In Russian)

34. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete, Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, 469 p.

35. Papadakis V.G. Effect of Carbonation on Concrete Durability, *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30, pp. 291–299.

36. Andrade C., Alonso C. Corrosion Rate Monitoring in Concrete Structures, *Construction and Building Materials*, 2004, vol. 18, pp. 567–573.

37. Bastidas-Arteaga E., Stewart M.G. Reliability of Reinforced Concrete Structures Subjected to Chloride Ingress, *Structural Safety*, 2015, vol. 56, pp. 13–22.

38. Biondini F., Frangopol D.M. Life-Cycle Performance of Reinforced Concrete Bridges, *Journal of Structural Engineering*, 2014, vol. 140 (3), 04013060.

39. Tang L., Nilsson L.O. Chloride Diffusion Modelling of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 1992, vol. 22, pp. 673–684.

40. Duracrete. Probabilistic Performance-Based Durability Design of Concrete Structures, Brussels, EU Brite-Euram Project Report, 2000, 350 p.

Received: March 19, 2026

Accepted: April 26, 2026

Author's information:

Saidkhon S. SALIKHANOV — PhD in Engineering, Professor of the Department “Bridges and Tunnels”, Tashkent State Transport University; saidkhansalikhanov@gmail.com

Eduard S. KARAPETOV — PhD in Engineering, Associate Professor of Bridges Department, Petersburg State Transport University; eskar@yandex.ru

УДК: 620.179.1

Компьютерная программа для определения параметров ультразвукового контроля сварных соединений в железнодорожной, а также в нефтегазотранспортной системах

В. Д. Афанасьева, А. А. Воробьев, В. Н. Коншина, С. В. Николаев

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

Для цитирования: Афанасьева В. Д., Воробьев А. А., Коншина В. Н., Николаев С. В. Компьютерная программа для определения параметров ультразвукового контроля сварных соединений в железнодорожной, а также в нефтегазотранспортной системах // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 483–490. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-483-490

Аннотация

В данной статье представлены результаты разработки компьютерной программы, позволяющей упростить и ускорить процесс расчета акустических параметров ультразвукового контроля сварных соединений с учетом требований к качеству сварных швов в транспортных системах. **Цель:** разработка компьютерной программы для автоматизации расчета акустических параметров ультразвукового контроля сварных соединений, применяемых в железнодорожной системе для сокращения временных затрат дефектоскописта и исключения ошибок при интерпретации нормативно-технической документации. **Методы:** программа реализована на языке Python с использованием библиотеки FreeSimpleGUI, что обеспечивает ее свободное распространение и независимость от лицензионных ограничений. В основу программного кода положены требования нормативных документов, регламентирующих ультразвуковой контроль сварных швов в транспортных системах. Интерфейс организован в виде шести рабочих вкладок, каждая из которых соответствует отдельному этапу настройки контроля: выбор нормативного документа, параметров ультразвуковой волны, типа сварного соединения, характеристик преобразователя, схем сканирования и настройки чувствительности. **Результаты:** создана компьютерная программа, позволяющая в интерактивном режиме выполнять расчет параметров прозвучиваемости, определять границы зон перемещения преобразователей, рассчитывать шаг сканирования, настраивать чувствительность, а также вычислять коэффициент выявляемости дефекта и его эквивалентную площадь. Предусмотрена проверка корректности расчетов на соответствие условиям дальнейшей зоны. Программа содержит встроенные справочные материалы и графические схемы контроля. **Практическая значимость:** объем программы составляет 20 Мб, что позволяет легко устанавливать ее на рабочие компьютеры без дополнительных требований к аппаратному обеспечению. Интуитивно понятный интерфейс и автоматизация расчетов сокращают время подготовки к контролю, минимизируют вероятность ошибок и повышают достоверность результатов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, сварные соединения, акустические параметры, неразрушающий контроль

Введение

Применение нормативно-технической документации (НТД) по ультразвуковому контролю (УЗК) сварных соединений в распечатанном или отсканированном виде затрудняет работу

дефектоскописта — увеличивает временные затраты на поиск сведений, соответствующих текущей ситуации контроля. При необходимости выполнения сложных расчетов, например, связанных с чувствительностью контроля

(коэффициента выявляемости дефекта K_d и эквивалентной площади дефекта S_d), существует вероятность возникновения ошибки в полученных результатах. Для облегчения работы дефектоскописта при использовании НТД и повышения точности выполняемых расчетов следует перевести сведения из НТД в формат программного кода, то есть в компьютерную программу.

Перед ее созданием важно полностью ознакомиться с содержанием НТД, на основе которой будет формироваться будущая программа, и выделить только те сведения, которые соответствуют контролю сварных соединений в соответствующей области: железнодорожной, а также в нефте- и газотранспортной системах [1–6].

Описание программы

Компьютерная программа написана на языке программирования Python с подключением библиотеки FreeSimpleGUI, которая является копией существующей библиотеки PySimpleGUI и обеспечивает свободное распространение разработанного программного продукта и независимость от лицензионных ограничений [6].

При запуске компьютерной программы необходимо выбрать нужный нормативный документ, тип сварного соединения (стыковое, угловое, нахлесточное или тавровое), а также указать толщину свариваемых элементов. Кнопка «Примечание» открывает справочное окно, которое может содержать расшифровку сокращений и аббревиатур или являться источником дополнительной информации (рис. 1).

Компьютерная программа содержит шесть рабочих вкладок (рис. 2). Во вкладке «Параметры УЗ-волны» необходимо указать значения скоростей ультразвуковой волны в материале объекта контроля (ОК), а также скорости ультразвуковой волны в материале призмы пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП). По кнопке «Справочник значений скоростей УЗ-волны» открывается дополнительное окно, содержащее справочные значения скоростей ультразвука в различных материалах (преимущественно в сталях).

Во вкладке «Параметры СС. Схема контроля» указываются значения, соответствующие выбранному ранее сварному соединению. По кнопке «Определение размера ОЗ (сведения из НТД)» открывается окно с размером около-

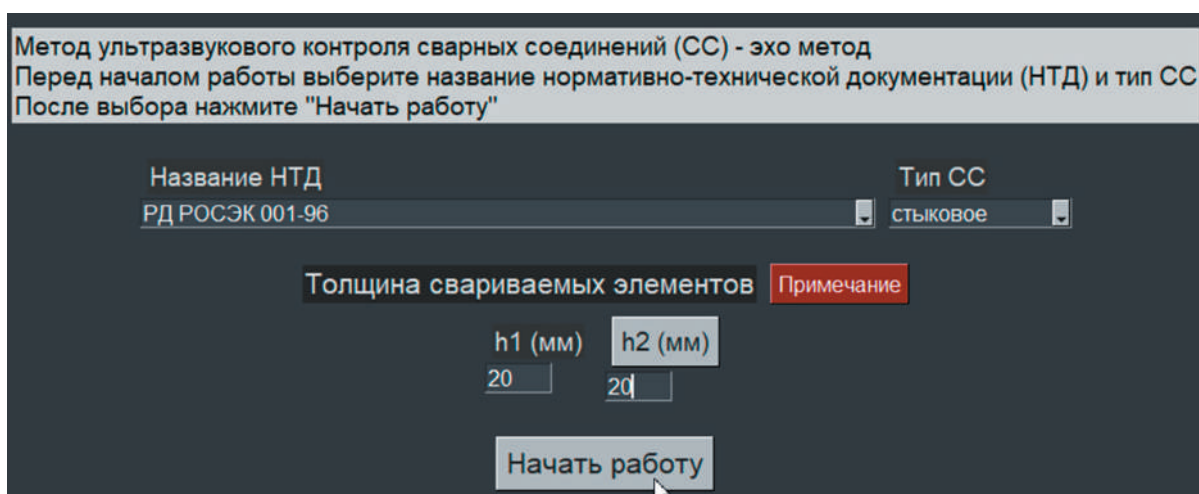


Рис. 1. Стартовое окно компьютерной программы

шовной зоны или сообщением об отсутствии сведений в НТД. При нажатии кнопки «Схема контроля» отображается схема контроля, соответствующая выбранным или введенным ранее параметрам сварного соединения (рис. 3).

Во вкладке «Параметры ПЭП» в верхней части окна при нажатии кнопки «Отобразить» выводится тип ПЭП и луча из выбранного ранее нормативного документа. Ниже осуществляется удобный вывод параметров ПЭП, соответствующий сведениям из верхней части окна. При нажатии кнопки «Выбор параметров наклонных ПЭП для контроля ОЗ»

открывается дополнительное окно со сведениями параметров наклонных ПЭП для контроля околошовной зоны. По кнопке «Условия прозвучиваемости» осуществляется проверка условия прозвучиваемости для стыковых соединений — выводится соответствующее сообщение в дополнительном окне. При нажатии кнопки «Пересчет прямоугольной пьезопластины в круглую» открывается дополнительное окно для ввода параметров длины и ширины прямоугольной пьезопластины и пересчета.

В случае разных значений толщин свариваемых элементов необходимо установить

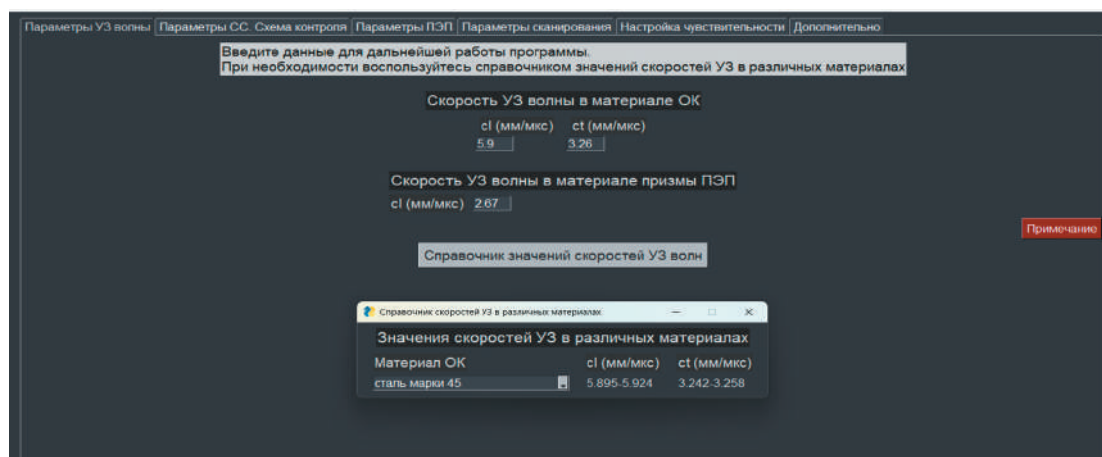


Рис. 2. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры УЗ-волны»

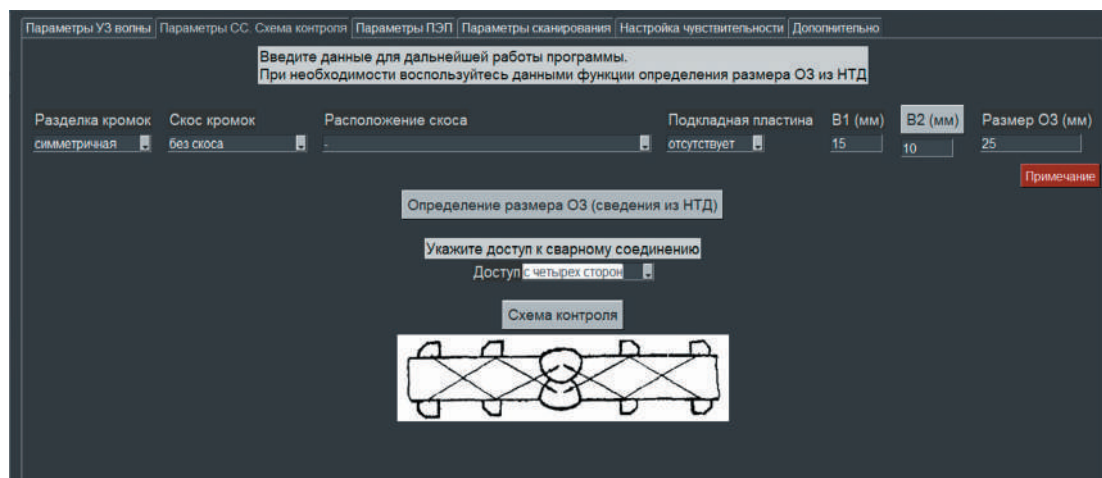


Рис. 3. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры СС. Схема контроля»

переключатель сначала для одного, а затем второго свариваемого элемента. Ввод параметров ПЭП необходим для дальнейшей работы программы (рис. 4).

Во вкладке «Параметры сканирования» осуществляется расчет границ зон перемещения ПЭП, а также вывод сведений о типе сканирования и значения шага сканирования. По кнопке «Схема границ зон перемещения ПЭП» отображается схема границ зон перемещения ПЭП. По двум кнопкам «Поперечно-продольное перемещение ПЭП» открываются дополнительные окна, позволяющие определить шаг сканирования по методикам ГОСТ 14782 [7]. По кнопке «Схема сканирования» отображается схема сканирования (рис. 5).

Во вкладке «Настройка чувствительности» при нажатии кнопки «Отобразить» выводится соответствующая информация: способ настройки, вид чувствительности, тип отражателя и его размеры, дополнительные сведения (поле «Сведения»). При нажатии кнопки ВРЧ открывается дополнительное окно для определения параметров настройки временной регулировки чувствительности (ВРЧ) и отображения схемы настройки ВРЧ. При нажатии

кнопки «Критерии браковки» открывается дополнительное окно с вводом параметров для определения критериев браковки, соответствующих выбранному ранее нормативному документу. При нажатии кнопки «Схема настройки / настроечного образца» отображается схема настройки чувствительности или настроечного образца для настройки чувствительности (рис. 6).

Во вкладке «Дополнительно» возможно произвести расчет коэффициента выявляемости дефекта K_d и эквивалентной площади дефекта S_d . По кнопке «Корректность расчета» выполняется проверка соответствия расчетов условию трех ближних зон ($r > 3r_{бли}$, где r — протяженность ультразвукового пучка, $r_{бли}$ — протяженность ближней зоны). Расчеты справедливы для дальней зоны ПЭП (рис. 7).

При нажатии кнопки «Пересчет углового отражателя (зарубки)» открывается дополнительное окно для ввода параметров углового отражателя и пересчета согласно ГОСТ Р 55724 [8].

В случае пропуска ввода или установки какого-либо параметра при выполнении любой из операций компьютерная программа

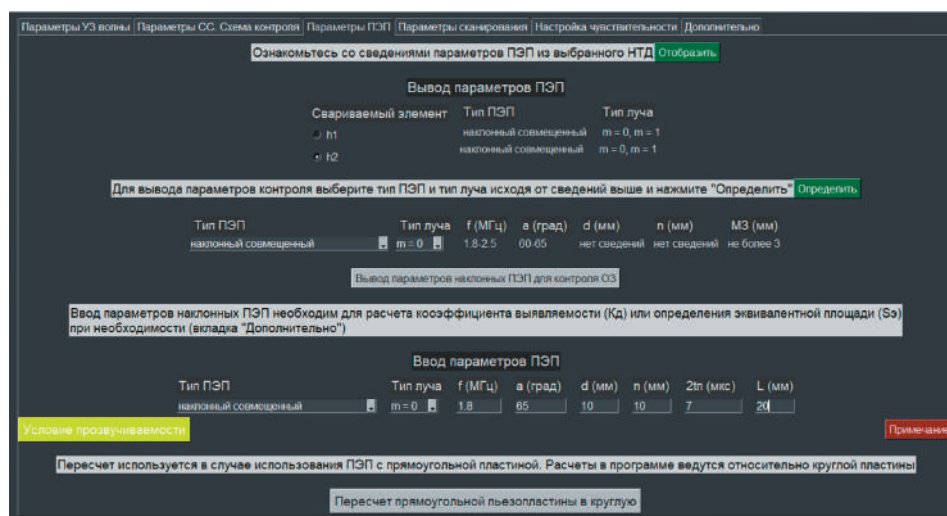


Рис. 4. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры ПЭП»

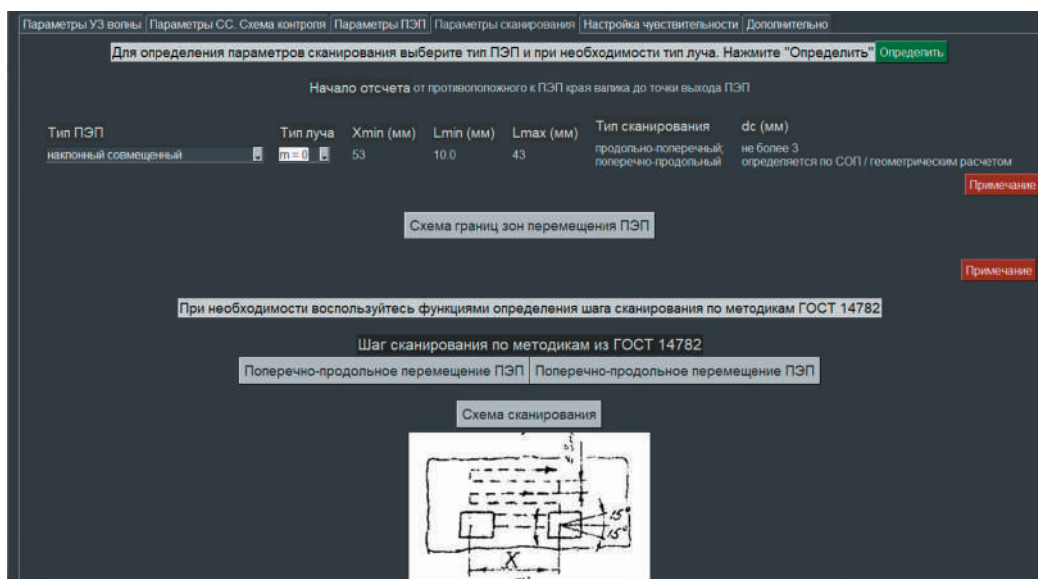


Рис. 5. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры сканирования»

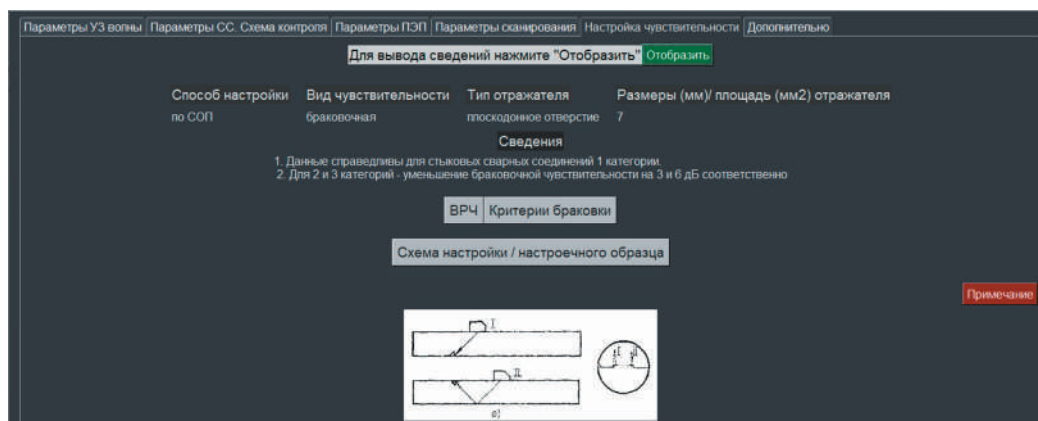


Рис. 6. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Настройка чувствительности»

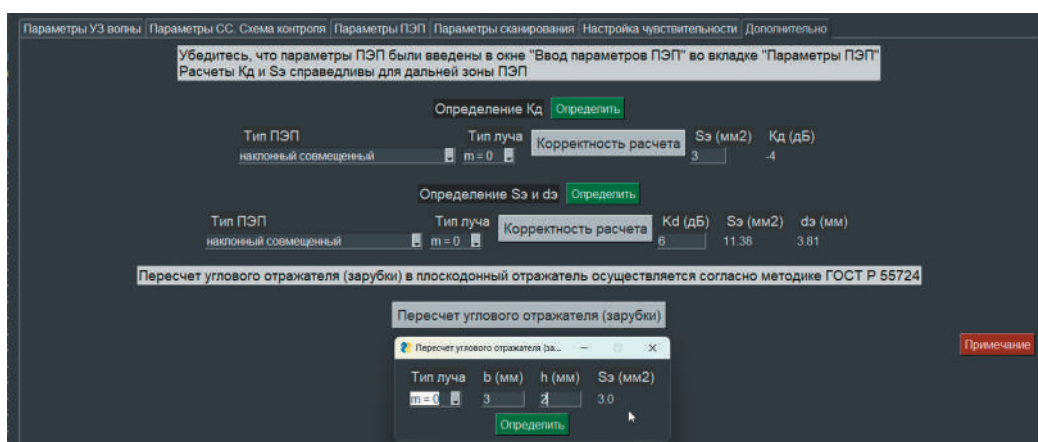


Рис. 7. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Дополнительно»

выводит сообщение об ошибке с указанием рекомендаций по исправлению и возобновлению дальнейшей работы.

Оперативность компьютерной программы обусловлена простотой пользовательского интерфейса. Объем программы составляет всего 20 Мб. Данное преимущество позволяет без затруднений устанавливать программу на компьютеры.

Заключение

Разработанная компьютерная программа позволяет автоматизировать процесс подготовки к ультразвуковому контролю сварных соединений в транспортных системах. За счет интеграции нормативно-технической документации в программный код достигается сокращение временных затрат дефектоскописта и исключаются ошибки при выполнении акустических расчетов. Простой интерфейс, встроенные справочные материалы и графические схемы обеспечивают удобство практического применения. Программа обладает низкими системными требованиями и может быть внедрена в лаборатории неразрушающего контроля, а также использована для обучения специалистов.

Список источников

1. ГОСТ 34991-2023. Соединения сварные в стальных конструкциях подвижного состава. Методы ультразвукового контроля.
2. РД РОСЭК 001-96. Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой. Основные положения. М.: Машиностроение, 1998.
3. СТО Газпром 15-2.3-005-2023. Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль качества сварных соединений. СПб.: ПАО «Газпром», ООО «Научно-исследовательский институт природных газовых технологий — ВНИИГАЗ», 2023.

4. СТО Газпром 15-1.3-004-2023. Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений промышленных и магистральных трубопроводов. СПб.: ПАО «Газпром», ООО «Научно-исследовательский институт природных газовых технологий — ВНИИГАЗ», 2023.

5. ОСТ 36-75-83. Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов. Ультразвуковой метод. М.: ВНИИМонтажспецстрой, 1984.

6. РД 19.100.00-КТН-545-06 Ультразвуковой контроль стенки сварных соединений при эксплуатации и ремонте вертикальных стальных резервуаров. М.: ОАО «АК «Транснефть», 2006.

7. Python: что это за язык программирования и где применяется. М.: Skillfactory Media, 2024. URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/python/>

8. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартинформ, 2005.

9. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Стандартинформ, 2019.

Дата поступления: 31.03.2026

Решение о публикации: 21.04.2026

Контактная информация:

АФАНАСЬЕВА Виктория Дмитриевна — магистрант кафедры «Наземные транспортные технологические комплексы»; nttk@pgups.ru
ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Наземные транспортные технологические комплексы»; nttk@pgups.ru
КОНШИНА Вера Николаевна — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Наземные транспортные технологические комплексы»; mpnk@pgups.ru
НИКОЛАЕВ Сергей Викторович — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Наземные транспортные технологические комплексы»; mpnk@pgups.ru

A Computer Program for Determining the Parameters of Ultrasonic Testing of Welded Joints in Railway and Oil and Gas Transportation Systems

V. D. Afanas'eva, A. A. Vorob'ev, V. N. Konshina, S. V. Nikolaev

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

For citation: Afanas'eva V. D., Vorob'ev A. A., Konshina V. N., Nikolaev S. V. A computer program for determining the parameters of ultrasonic testing of welded joints in railway and oil and gas transportation systems // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 483–490. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-483-490 (In Russian)

Abstract

This article presents the results of developing a computer program to simplify and accelerate the process of calculating the acoustic parameters of ultrasonic testing of welded joints, taking into account the quality requirements for welds in transport systems. **Objective:** to develop a computer program to automate the calculation of acoustic parameters of ultrasonic testing of welded joints used in the railway system, with the aim of reducing the time spent by a flaw detector operator and eliminating errors in the interpretation of regulatory and technical documentation. **Methodology:** the program is implemented in Python using the FreeSimpleGUI library, which ensures its free distribution and independence from licensing restrictions. The program code is based on the requirements of regulatory documents governing the ultrasonic testing of welds in transport systems. The interface is organized into six working tabs, each of which corresponds to a separate stage of testing setup: selection of a regulatory document, ultrasonic wave parameters, weld type, transducer characteristics, scanning schemes, and sensitivity settings. **Results:** a computer program has been developed that allows interactive calculation of sound parameters, determination of transducer movement zones, calculation of scanning pitch, sensitivity adjustment, and calculation of the defect detection coefficient and equivalent defect area. A calculation verification function is provided to ensure compliance with far-field conditions. The program contains built-in reference materials and graphical inspection diagrams. **Practical significance:** the program's 20 MB size allows for easy installation on workstations without additional hardware requirements. The intuitive interface and automated calculations reduce inspection preparation time, minimize the likelihood of errors, and increase the reliability of ultrasonic flaw detection results for welded joints.

Keywords: ultrasonic testing, welded joints, acoustic parameters, non-destructive testing

References

1. GOST 34991-2023. Soedineniya svarnye v stal'nykh konstruktsiyakh podvizhnogo sostava. Metody ul'trazvukovogo kontrolya [Welded Joints in Steel Structures of Rolling Stock. Methods of Ultrasonic Control]. (In Russian)
2. RD ROSEK 001-96. Mashiny gruzopod'emnye. Konstruktsii metallicheskie. Kontrol' ul'trazvukovoj. Osnovnye polozheniya [Lifting Machines. Metal Structures. Ultrasonic Control. The Main Provisions], Moscow, Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1998. (In Russian)
3. STO Gazprom 15-2.3-005-2023. Svarka i nerazrushayushchij kontrol' svarnykh soedinenij. Ul'trazvukovoj kontrol' kachestva svarnykh soedinenij [Welding and Non-Destructive Testing of Welded Joints. Ultrasonic Quality Control of Welded Joints], Saint Petersburg, Gazprom PJSC, VNIIGAZ [Scientific Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies LLC], 2023. (In Russian)

4. STO Gazprom 15-1.3-004-2023. Svarka i nerazrushayushchij kontrol' svarnykh soedinenij. Nerazrushayushchie metody kontrolya kachestva svarnykh soedinenij promyslovykh i magistral'nykh truboprovodov [Welding and Non-Destructive Testing of Welded Joints. Non-Destructive Methods of Quality Control of Welded Joints of Field and Main Pipelines], Saint Petersburg, Gazprom PJSC, VNIIGAZ [Scientific Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies LLC], 2023. (In Russian)

5. OST 36-75-83. Kontrol' nerazrushayushchij. Svarnye soedineniya truboprovodov. Ul'trazvukovoj metod [The Control is Non-Destructive. Welded Joints of Pipelines. Ultrasonic Method], Moscow, VNIIMontazhspestroj [All-Union Scientific Research Institute for Installation and Special Construction Works], 1984. (In Russian)

6. RD 19.100.00-KTN-545-06 Ul'trazvukovoj kontrol' stenki svarnykh soedinenij pri ekspluatatsii i remonte vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov [Ultrasonic Inspection of the Wall of Welded Joints During Operation and Repair of Vertical Steel Tanks], Moscow, OAO "AK "Transneft" [AC "TRANSNEFT"], 2006. (In Russian)

7. Python: chto eto za yazyk programirovaniya i gde primenyaetsya [Python: What Kind of Programming Language Is It and Where Is It Used?], Skillfactory Media, Moscow, 2024. URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/python/> (In Russian)

8. GOST 14782-86. Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Metody ul'trazvukovye [The Control Is Non-Destructive. The Joints Are Welded. Ultrasonic Methods], Moscow, Standartinform, 2005. (In Russian)

9. GOST R 55724-2013. Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Metody ul'trazvukovye [The Control Is Non-Destructive. The Joints Are Welded. Ultrasonic Methods], Moscow, Standartinform, 2019. (In Russian)

Received: March 31, 2026

Accepted: April 21, 2026

Author's information:

Viktoria D. AFANAS'EVA — Master's Student of the Department "Land transport technological complexes"; nttk@pgups.ru

Aleksandr A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department "Land transport technological complexes"; nttk@pgups.ru

Vera N. KONSHINA — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department "Land Transport Technological Complexes"; mpnk@pgups.ru

Sergej V. NIKOLAEV — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department "Land Transport Technological Complexes"; mpnk@pgups.ru

УДК 004.942

Цифровизация экологического мониторинга строительного производства на основе технологии «Строительный конвейер»

К. Ф. Исламов¹, 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: Исламов К. Ф., Казанская Л. Ф. Цифровизация экологического мониторинга строительного производства на основе технологии «Строительный конвейер» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 491–502. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-491-502

Аннотация

Цель: разработка подхода к цифровизации экологического мониторинга строительного производства на основе расширения архитектуры системы «Строительный конвейер» экологическими параметрами. **Методы:** исследование проведено методом расширения существующей программной реализации системы «Строительный конвейер» функциями экологического мониторинга. **Результаты:** представлен подход к цифровизации экологического мониторинга строительного производства на основе технологии «Строительный конвейер» — системы поэтапного управления строительством с использованием информационного моделирования зданий (Building Information Modeling, BIM). Описана модульная архитектура системы, включающая элементную строительную номенклатуру (ЭСН), паспорта конструктивных BIM-элементов, целевой график строительства, наряды завтрашнего дня и корпоративные сметные нормы. Предложено расширение каждого компонента системы экологическими параметрами: углеродный след элемента, нормативы образования строительных отходов по классам опасности, показатели энергоэффективности производства элементов, данные о переработке и утилизации строительных материалов. **Практическая значимость:** внедрение технологии на реальных строительных объектах приводит к снижению перерасхода материалов на 8–12%, что эквивалентно сокращению образования строительных отходов на 150–300 т на объект, а также к сокращению продолжительности строительства на 18%, что уменьшает период экологического воздействия строительной площадки на окружающую среду. Практическая реализация технологии осуществлена через три специализированных программных модуля, каждый из которых дополнен экологическими функциями.

Ключевые слова: экологический мониторинг, строительный конвейер, BIM, цифровизация, углеродный след, строительные отходы, экологическая безопасность, паспорт элемента, устойчивое строительство, ресурсоэффективность

Введение

Строительная отрасль занимает особое место среди источников экологического воздействия на окружающую среду. По данным Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП), на строительство и эксплуатацию зданий при-

ходится до 37% глобальных выбросов парниковых газов, около 30% образования твердых отходов и до 40% потребления первичной энергии [1]. В Российской Федерации строительная отрасль генерирует ежегодно более 70 млн т отходов, значительная часть которых

не подвергается переработке [2]. Федеральный закон №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и Стратегия экологической безопасности РФ до 2025 года устанавливают требования к снижению экологического воздействия, однако в строительной практике систематический мониторинг экологических показателей остается фрагментарным.

Ключевой проблемой является отсутствие сквозной цифровой системы, связывающей проектные решения с их реальным экологическим воздействием на уровне отдельных конструктивных элементов. Существующие подходы к экологическому мониторингу строительства, как правило, оперируют укрупненными показателями на уровне проекта в целом, не обеспечивая детализации до уровня конкретных работ и элементов [3]. Это не позволяет выявлять источники перерасхода материалов, избыточного образования отходов и неэффективного использования ресурсов на ранних стадиях.

Технология «Строительный конвейер», разработанная на кафедре строительства Набережночелнинского института (филиала) Казанского федерального университета для управления строительным производством [4], обеспечивает поэлементный учет всех ресурсов и работ с использованием информационного моделирования зданий (BIM). Практическое внедрение на реальных объектах продемонстрировало сокращение продолжительности строительства на 18% и снижение трудозатрат на 12%, а также выявило систематический перерасход материалов на 8–12% по сравнению с нормативными значениями государственных элементных сметных норм (ГЭСН) [4–6].

Целью настоящей работы является разработка подхода к цифровизации экологического мониторинга строительного производства на основе расширения архитектуры системы

«Строительный конвейер» экологическими параметрами. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- анализ архитектуры системы и определение точек интеграции экологических показателей;
- разработка экологического расширения паспорта элемента;
- оценка потенциала снижения экологического воздействия на основе практических результатов внедрения.

Значимость работы определяется необходимостью перехода от эпизодического экологического контроля строительства к непрерывному цифровому мониторингу на основе поэлементного учета. Технология «Строительный конвейер» представляет собой модульную архитектуру, обеспечивающую сквозную цифровизацию строительного производства и являющуюся естественной платформой для интеграции экологического мониторинга [4–6].

Методы и материалы

В работе использованы аналитические, статистические методы, а также методы информационного моделирования и расширения функциями экологического мониторинга существующей (разработанной авторами с коллегами ранее) и внедренной системы «Строительный конвейер».

Результаты

Система «Строительный конвейер» реализована как модульная архитектура, обеспечивающая сквозную цифровизацию строительного производства от проектирования до сдачи объекта. Принципиальная схема системы (рис. 1) демонстрирует взаимосвязь ключевых компонентов.

Элементная строительная номенклатура (ЭСН) — патентованная система цифровизации элементов здания, основанная на

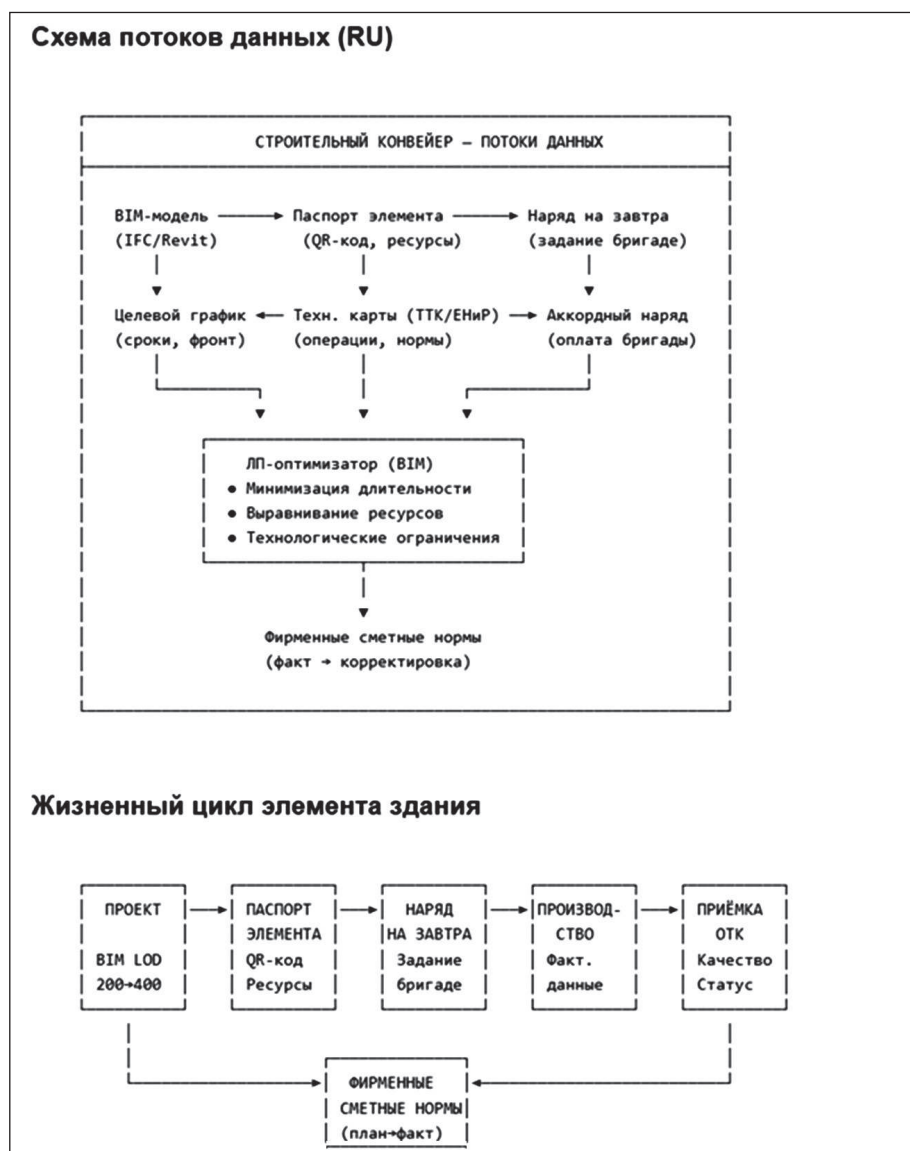


Рис. 1. Принципиальная схема проекта «Строительный конвейер»

принципах базы ГЭСН и содержащая информацию о технологии и ресурсах для строительства каждого элемента, имеющего уникальный идентификатор ЭСН (рис. 2).

Паспорт конструктивного BIM-элемента — информационная модель для каждого элемента здания, заполненная нормативной документацией, содержащая информацию о трудовых и материальных ресурсах с возможностью просмотра фактических показателей в реальном времени (рис. 3).

Целевой график строительства — утвержденный участниками строительства договорной срок выполнения работ по принципу фронта работ, обеспечивающий контроль сроков возведения строительной модели BIM (рис. 4).

Наряд завтрашнего дня — ключевой элемент детального планирования по бригадам и микроучасткам целевого графика. Предлагает ежедневное поэлементное планирование работ, включает информацию о необходимых трудовых и материальных ресурсах,

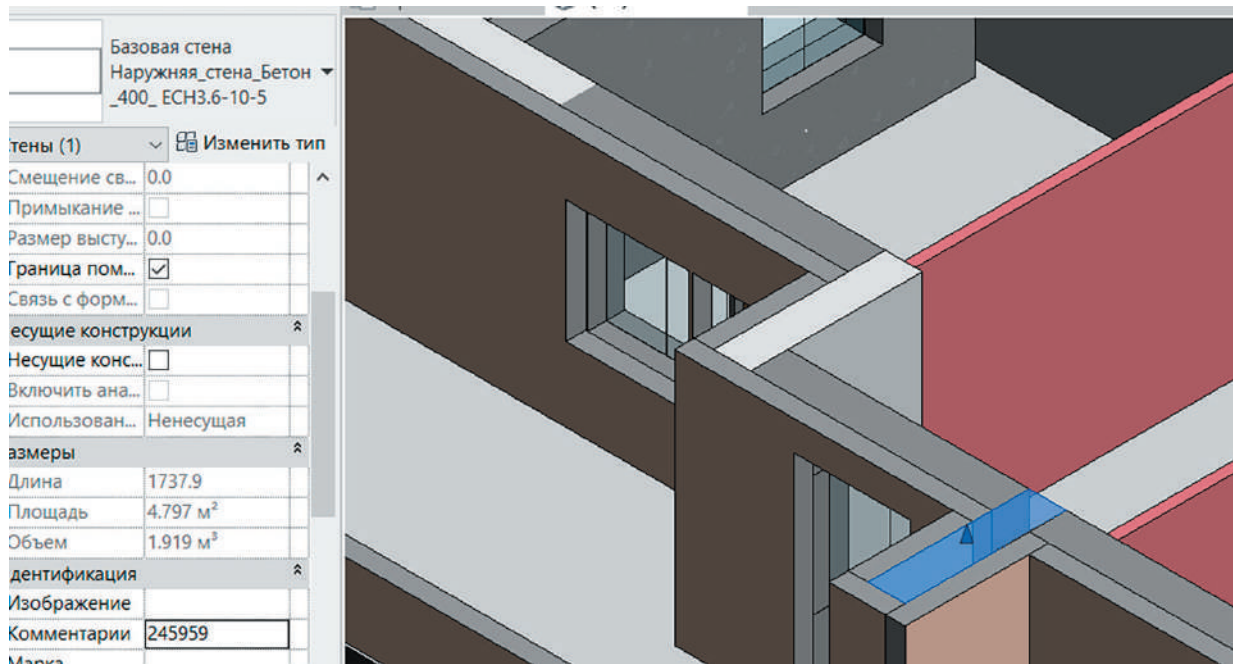


Рис. 2. Элементная строительная номенклатура

НАРЯД НА ЗАВТРА				15.04.2019			
ПАСПОРТ ЭЛЕМЕНТА ЗДАНИЯ				начало		окончание	
242692		П-4		2,38		6	
2160		Уровень 2		Устройство железобетонных стен и перегородок высотой: до 3 м, толщиной 500 мм			
06-01-031-05		Исполнение «ТИМ Модели»		НА ОБЪЕМ			
Затраты труда рабочих		3,18		чел.-ч.			
Средний разряд работы		3,2		Затраты труда маш.крана			
48,26		чел.-ч.		Фирменная Элементная Стоимость предприятия (ФЭСп)			
Затраты труда рабочих		0		чел.-ч.			
превышение		0		выше			
нормально		0,00		ниже			
ФАКТИЧЕСКИЙ				Затраты труда рабочих			
Средний разряд работы				чел.-ч.			
Затраты труда машинистов				чел.-ч.			
элементарии:				учетное время производства			
затрачено всего				0 часов			
время начала				часов			
время окончания				часов			
дата окончания		21-ти этажный жилой дом с магазином на 1-ом этаже					
Наименование объекта		И.Челны, Комсомольский р-н 10/71					
Адрес размещения							

Рис. 3. Информационная модель паспорта элемента



Рис. 4. Целевой график строительства

накапливает фактические показатели по результатам выполнения.

Корпоративные сметные нормы сохраняются для каждого возведенного элемента строительной модели BIM, содержат фактические трудовые и материальные затраты, формируют проверенную базу для будущих проектов, отображают реальные поэлементные затраты организации (рис. 5).

Каждый из пяти ключевых компонентов системы «Строительный конвейер» может быть расширен экологическими параметрами для обеспечения непрерывного экологического мониторинга строительного производства:

1. Элементная строительная номенклатура (ЭСН) дополняется экологическими характеристиками каждого элемента: углеродный след материалов (кг CO₂-экв.), класс экологической опасности строительных отходов, коэффициент рециклируемости материалов, нормативы образования отходов при производстве элемента по СП 17.13330 и ГОСТ Р 57678-2017 [7].

2. Паспорт конструктивного BIM-элемента расширяется разделом «Экологический паспорт»,

содержащим фактический углеродный след производства элемента, объем образованных отходов по классам опасности (I–V), данные об источниках материалов и сертификатах экологической безопасности, показатели энергопотребления при производстве, данные о возможности повторного использования и утилизации [8].

3. Целевой график строительства дополняется экологическими контрольными точками: сроками вывоза строительных отходов, графиками замеров уровня шума и пыли, периодами ограничения работ вблизи водоохранных зон, сроками рекультивации нарушенных территорий.

4. Наряд завтрашнего дня включает экологические требования экологического соответствия, фиксацию фактического объема отходов по завершении работ.

5. Корпоративные сметные нормы накапливают фактические объемы отходов в сравнении с нормативными, энергопотребление на единицу элемента. Эти данные формируют корпоративную экологическую базу, позволяющую прогнозировать и минимизировать воздействие на будущих проектах.

НАРЯД НА ЗАВТРА				15.04.2026			ОКОНЧАНИЕ	
ПАСПОРТ ЭЛЕМЕНТА ЗДАНИЯ				НАЧАЛО			ОКОНЧАНИЕ	
скопировать QR	242692	Р-ч	2.38	6	2160	Уровень 2	242692.png	
QR	ID код	Марка	Объем м3	Площадь м2	Длина мм	Уровень	изображение	
	код производства	Устройство железобетонных стен и перегородок высотой: до 3 м, толщиной 500 мм						
	06-01-031-05							
http://ceddream.ru/uid246461/				КНОПКИ				
GUID код - ссылка на сайт				Затраты труда р	3.18	чел.-ч.		
ИСПОЛНЕНИЕ «ТИМ Модели»				средний разряд работы	3.2			
дрядчик - заказчик КС-2	ДА	НЕТ	Затраты труда маш.крана	20.3	чел.-ч.			
дрядчик - заказчик КС-3	ДА	НЕТ	Элементарная Элементарная Стоимость предприятия (С					
отмечается на исполнительной ТИМ Модели				затраты труда рабочих	0	чел.-ч.		
ИМПЛЕКТОВОЧНАЯ норма				превышение	0	выше		
Арматура	0.024	кг	нормально	0.00	ниже			
Бетон	2.42	м3	ФАКТИЧЕСКАЯ					
досок толщиной 25 мм	1.76	м3	затраты труда рабочих		чел.-ч.			
Доски обрезные хвойн	0.04	м3	Средний разряд работы					
Бруски обрезные хвойн	0.003	м3	затраты труда машинистов		чел.-ч.			
Гвозди строительные	1.21	кг	комментарии:					
Гвозди строительные	1.21	кг						
Болты с гайками и шайб	2.14	кг	учетное время производства					
Известь строительная:	1.0	кг	затрачено всего	0	часов			
дата начала			время начала		часов			
дата окончания			время окончания		часов			
Наименование объекта	21-ти этажный жилой дом с магазином на 1-ом этаже							
Адрес размещения	Н.Челны, Комсомольский р-н 10/71							

Рис. 5. Корпоративные сметные нормы

Практическая реализация технологии «Строительный конвейер» осуществлена через три специализированных программных модуля, обеспечивающих полный цикл управления строительным производством.

Модуль «Сбор данных» (рис. 6) обеспечивает:

- выгрузку информационной модели в базу данных;
- формирование нарядов завтрашнего дня по дням/захваткам/бригадам согласно плану работ;
- ручной и автоматизированный ввод фактических данных о выполнении работ;
- создание и управление паспортами элементов;
- интеграцию с BIM-моделью для получения актуальной информации об элементах.

Модуль «Аналитика данных» (рис. 7) предоставляет:

- сводные данные по объектам и захваткам;

- потребление ресурсов по работам по дням/захваткам/бригадам;

- аналитику по нарядам завтрашнего дня (план-факт);

- формирование отчетов о производительности и отклонениях;

- визуализацию данных для принятия управленческих решений.

Модуль «Оптимизация параметров» (рис. 8) реализует:

- формирование элементной базы проекта;
- проработку технологических последовательностей;

- создание перечня технологических ограничений;

- оптимизацию распределения ресурсов и последовательности работ;

- генерацию вариантов календарных графиков с оценкой эффективности.

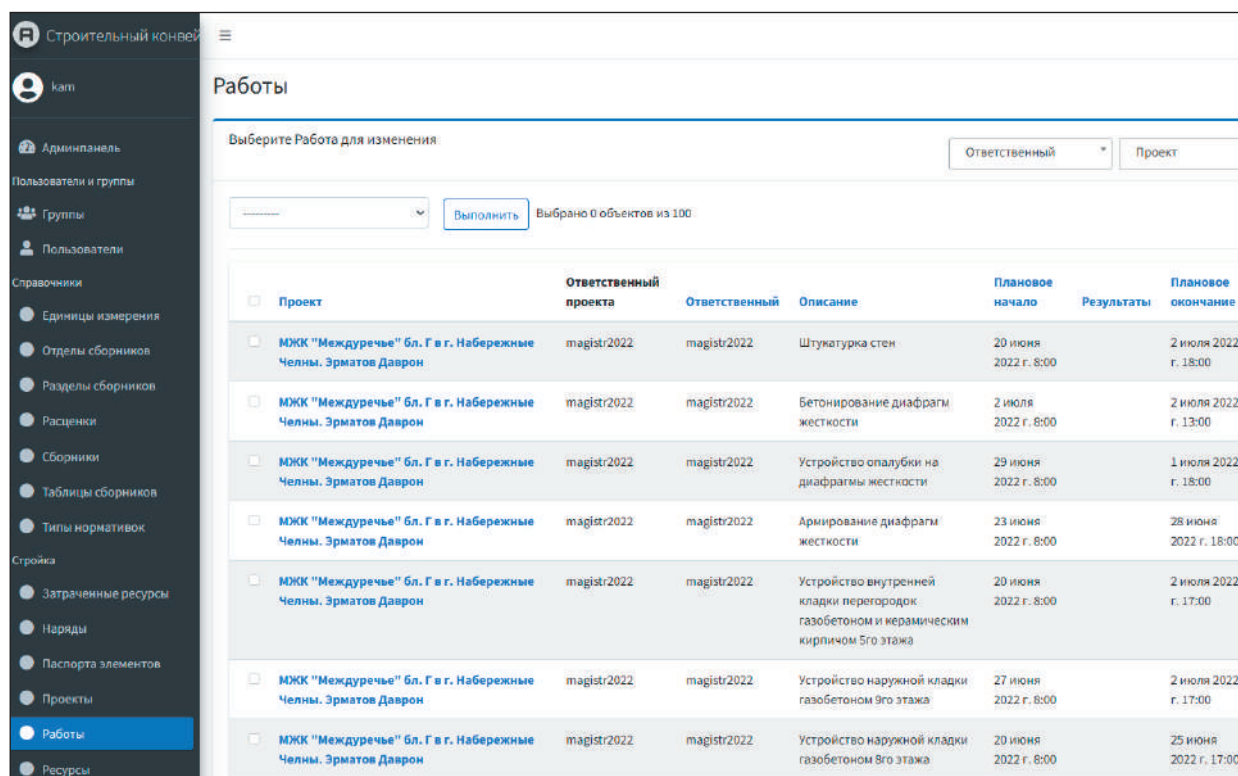


Рис. 6. Структура модуля «Сбор данных»

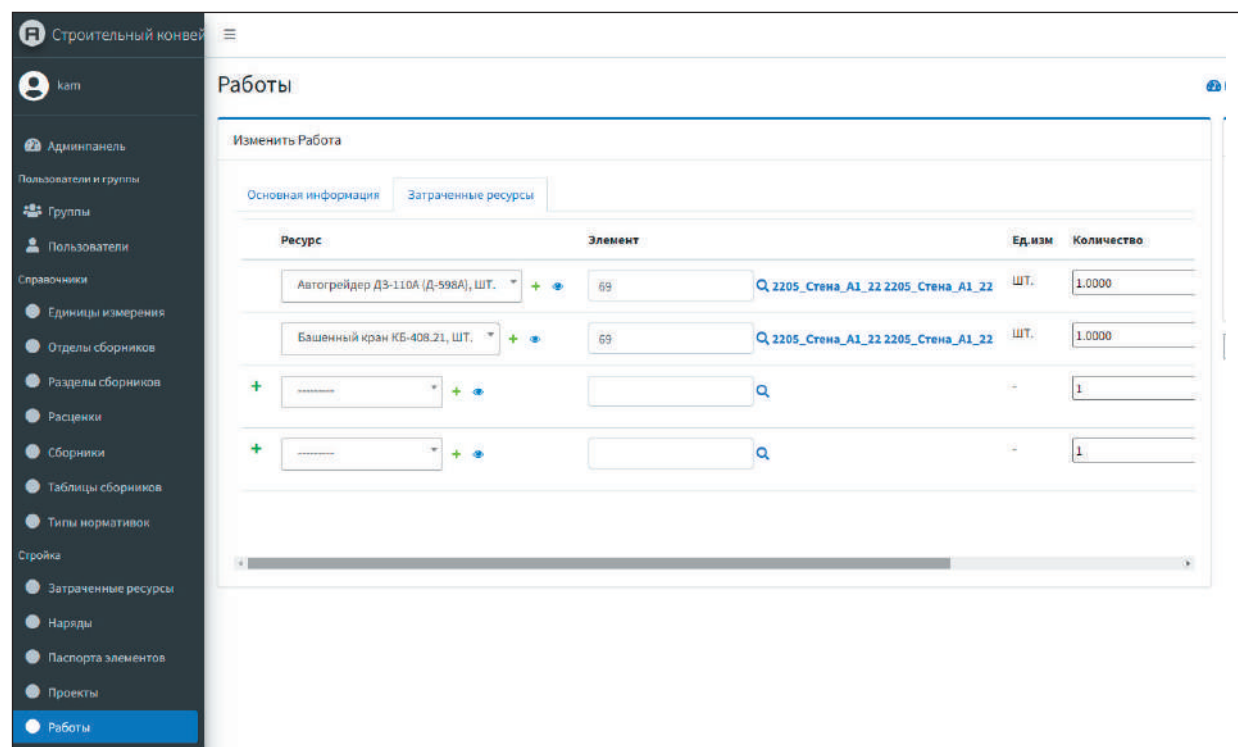


Рис. 7. Структура модуля «Аналитика данных»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Математическая модель для определения оптимального решения стоимости придерживается критических ограничений:

- ограничения по стоимости:

$$0,10y_{11} + 0,31y_{12} + 0,29y_{13} + 0,18y_{14} \leq 1$$

$$0,11y_{21} + 0,35y_{22} + 0,35y_{23} + 0,25y_{24} \leq 1$$

- ограничения по качеству:

$$0,69x_{11} + 0,75x_{12} + 0,6x_{13} + 0,70x_{14} + 0,69x_{21} + 0,8x_{22} + 0,91x_{23} + 0,78x_{24} \leq 4$$

- ограничения по продолжительности:

$$3,5z_{11} + 15z_{12} + 11z_{13} + 15,5z_{14} \leq 40$$

$$3z_{21} + 12z_{22} + 9z_{23} + 12z_{24} \leq 40$$

Рис. 8. Алгоритм оптимизации параметров

Дискуссия

Система обеспечивает визуализацию всех процессов строительства в 4D-формате (рис. 9), позволяя участникам строительства в реальном времени отслеживать прогресс выполнения работ, анализировать отклонения и принимать обоснованные решения.

Расширение программных модулей экологическими функциями обеспечивает непрерывный мониторинг воздействия на окружающую среду на всех этапах строительного производства:

1. Модуль «Сбор данных» дополнен функциями экологического учета: регистрацией объемов образования отходов по классам опасности при производстве каждого элемента, фиксацией фактического расхода материалов с расчетом отклонений от нормативных показателей, автоматическим формированием экологической отчетности по формам 2-ТП (отходы) на основе накопленных поэлементных данных [2].

2. Модуль «Аналитика данных» обеспечивает экологические дашборды: визуализацию углеродного следа проекта в разрезе элементов и видов работ, мониторинг динамики об-

разования отходов в сравнении с нормативами, анализ отклонений расхода материалов от проектных значений с выявлением источников перерасхода, формирование рейтинга экологической эффективности бригад и участков.

3. Модуль «Оптимизация параметров» реализует минимизацию экологического воздействия: оптимизацию последовательности работ с учетом ограничений по уровню шума и пыли, выбор вариантов календарного графика с минимальным совокупным углеродным следом, планирование логистики материалов для снижения транспортных выбросов, оптимизацию раскроя материалов для минимизации отходов [9].

Практическое внедрение технологии «Строительный конвейер» на реальных строительных объектах (трехэтажный многоквартирный жилой дом, ремонт квартиры 70 м²) позволило получить количественные данные, имеющие прямое экологическое значение [4].

Поэлементный план-фактный анализ выявил систематический перерасход материалов на 8–12% по различным позициям. Основные причины: технологические потери при раскрое и подгонке, бой и повреждения при

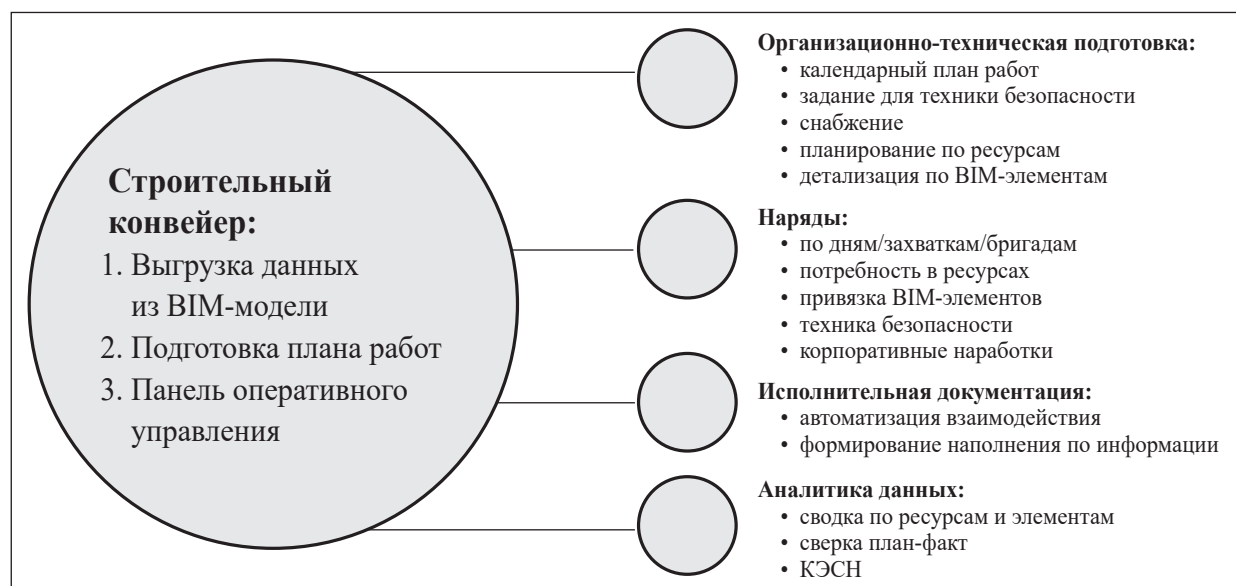


Рис. 9. Визуализация проекта «Строительный конвейер»

транспортировке, необоснованные запасы [4]. Перерасход материалов непосредственно транслируется в увеличение объема строительных отходов. Система «Строительный конвейер» обеспечивает выявление источников перерасхода на уровне отдельных элементов, что позволяет адресно корректировать технологию производства и снижать образование отходов.

При среднем перерасходе материалов 10% и типовом объеме строительства многоквартирного дома (3000 м³ конструкций) элементный контроль потенциально снижает объем строительных отходов на 150–300 т на объект, что эквивалентно сокращению выбросов CO₂ на 45–90 т (коэффициент 0,3 тCO₂/т отходов, по данным ЮНЕП [1]).

Сокращение продолжительности строительства на 18% достигнуто за счет оптимизации последовательности производства элементов, минимизации простоев и эффективного использования фронта работ [4]. Экологический эффект сокращения сроков включает уменьшение периода воздействия строительной площадки на окружающую среду (шум, пыль,

вибрация), снижение объема транспортных перевозок и связанных выбросов, сокращение потребления электроэнергии на площадке.

Снижение трудозатрат на 12% означает пропорциональное уменьшение транспортных потоков (доставка рабочей силы), что для объекта с 30 работниками при среднем плече 15 км и удельных выбросах 0,12 кг CO₂/км составляет экономию около 2,5 т CO₂ за период строительства.

Практические внедрения продемонстрировали ключевую особенность технологии «Строительный конвейер» для экологического мониторинга — систему корпоративных сметных норм, накапливающую фактические показатели выполнения работ. Расширение этой системы экологическими параметрами создает корпоративную экологическую базу данных, содержащую:

- фактический углеродный след по видам работ и типам элементов в сравнении с нормативными значениями;
- реальные объемы образования отходов по классам опасности с привязкой к конкретным видам работ;

- показатели энергопотребления строительных машин и механизмов при производстве каждого типа элемента;
- коэффициенты технологических потерь материалов, формирующие основу для прогнозирования объемов отходов на будущих проектах.

Накопление данных по множеству проектов при определенной научной выборке позволяет перейти от нормативного прогнозирования экологического воздействия к прогнозированию на основе фактических данных, существенно повышая точность экологической оценки и планирования природоохранных мероприятий [10].

Заключение

Предложенный подход к цифровизации экологического мониторинга строительного производства на основе технологии «Строительный конвейер» обеспечивает переход от эпизодического экологического контроля к непрерывному поэлементному мониторингу экологического воздействия.

Основные результаты работы:

1. Разработано экологическое расширение пяти ключевых компонентов системы «Строительный конвейер»: элементной строительной номенклатуры, паспорта элемента, целевого графика, наряда завтрашнего дня и корпоративных сметных норм. Каждый компонент дополнен параметрами углеродного следа, образования отходов, энергопотребления и рециклируемости материалов.
2. Описаны экологические функции трех программных модулей системы: сбора экологических данных, аналитики воздействия на окружающую среду, оптимизации с учетом экологических ограничений.
3. На основе практических результатов внедрения количественно оценен экологический

потенциал технологии: снижение перерасхода материалов на 8–12% (сокращение отходов на 150–300 т на объект), уменьшение продолжительности строительства на 18% (сокращение периода экологического воздействия площадки), снижение транспортных выбросов CO₂.

4. Предложена концепция корпоративной экологической базы данных, формируемой на основе фактических поэлементных показателей и обеспечивающей переход к предиктивному экологическому планированию на будущих проектах.

Перспективы развития связаны с интеграцией AI-технологий для автоматического прогнозирования экологического воздействия, подключением IoT-датчиков для мониторинга шума, пыли и вибрации в реальном времени, а также с формированием отраслевой базы экологических нормативов строительного производства.

Список источников

1. United Nations Environment Programme 2022. Global Status Report for Buildings and Construction. Nairobi: UNEP, 2022. 101 p.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». М.: Минприроды России, 2024. 717 с.
3. A Review of Recycled Aggregate in Concrete Applications (2000–2017) / V. W. Y. Tam [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 133. Pp. 272–285. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.025
4. Использование технологии «Строительный конвейер» при строительном производстве многоквартирного трехэтажного жилого дома / К. Ф. Исламов [и др.] // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 1. URL: <https://esj.today/PDF/75SAVN123.pdf>
5. Akhmetov F., Islamov K., Sovkov S. Building management using information modeling technology // E3S Web of Conferences (Chelyabinsk, February 17–19, 2021). Chelyabinsk, 2021. P. 09047. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809047

6. Ахметов Ф.М., Исламов К.Ф. Информационное моделирование строительства // Строительное производство. 2020. № 1. С. 115–118.
7. ГОСТ Р 57678-2017 «Зеленые» стандарты. Оценка экологической эффективности здания. М.: Стандартиформ, 2017.
8. Embodied GHG Emissions of Buildings. The Hidden Challenge for Effective Climate Change Mitigation / M. Röck [et al.] // Applied Energy. 2020. Vol. 258. P. 114107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107
9. Big Data in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities, And Future Trends / M. Bilal [et al.] // Advanced Engineering Informatics. 2016. Vol. 30. Pp. 500–521. DOI: 10.1016/j.aei.2016.07.001
10. Анализ внедрения технологии информационного моделирования в Российских строительных компаниях по проектированию и строительству инженерных систем / В. С. Рашев [и др.] // Вестник Евразийской науки, 2020. № 3.
- Дата поступления: 06.04.2026
Решение о публикации: 11.05.2026

Контактная информация:

ИСЛАМОВ Камиль Фаритович — кандидат техн. наук, доцент; kam@kambox.ru
КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — доктор техн. наук, профессор; yalifa@inbox.ru

Digitalization of Environmental Monitoring in Construction Production Based on the Construction Conveyor Technology

K. F. Islamov¹, L. F. Kazanskaya²

¹Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University, 13 Mira ave., Naberezhnye Chelny, 423800, Russia

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

For citation: *Islamov K. F., Kazanskaya L. F.* Digitalization of Environmental Monitoring in Construction Production Based on the Construction Conveyor Technology // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 491–502. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-491-502 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop an approach to the digitalization of environmental monitoring in construction production based on expanding the architecture of the Construction Pipeline system with environmental parameters. **Methods:** the study was conducted by expanding the existing software implementation of the Construction Pipeline system with environmental monitoring functions. **Results:** an approach to the digitalization of environmental monitoring of construction production based on the technology of the “Construction conveyor” is presented — a system of element-by-element construction management using building information modeling (BIM). The modular architecture of the system is described, including the element construction nomenclature (ECN), the passport of constructive BIM elements, the target construction schedule, the orders of tomorrow, and the corporate estimates. It is proposed to expand each component of the system with environmental parameters: the carbon footprint of the element, the standards for the formation of construction waste by hazard classes, the indicators of energy efficiency of the production of elements, and data on the recycling and disposal of construction materials. **Practical significance:** the practical results of the technology implementation at real construction sites demonstrate a reduction in material overspending by 8–12%, which is equivalent to a reduction in construction waste by 150–300 tons per site, as well as a reduction in construction duration by 18%, which directly reduces

the environmental impact of the construction site on the environment. The technology was implemented in practice through three specialized software modules, each of which is complemented by environmental functions.

Keywords: environmental monitoring, construction conveyor, BIM, digitalization, carbon footprint, construction waste, environmental safety, element passport, sustainable construction, resource efficiency

References

1. United Nations Environment Programme 2022, Global Status Report for Buildings and Construction, Nairobi, UNEP, 2022, 101 p.
2. Gosudarstvennyj doklad “O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2023 godu” [State Report “On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2023”], Minprirody Rossii [Russian Ministry of Nature], Moscow, 2024, 717 p. (In Russian)
3. Tam V.W.Y., et al. A Review of Recycled Aggregate in Concrete Applications (2000–2017), *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 133, pp. 272–285. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.025
4. Islamov K.F., et al. Ispol’zovanie tekhnologii “Stroitel’nyj konvejer” pri stroitel’nom proizvodstve mnogokvartirnogo tryohetazhnogo zhilogo doma [The Use of “Construction Conveyor” Technology in the Construction of Multi-Family Three-Storey Residential Building], *Vestnik evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]*, 2023, vol. 15, no. 1. URL: <https://esj.today/PDF/75SAVN123.pdf> (In Russian)
5. Akhmetov F., Islamov K., Sovkov S. Building Management Using Information Modeling Technology, E3S Web of Conferences, Chelyabinsk, February 17–19, 2021, Chelyabinsk, 2021, p. 09047. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809047
6. Ahmetov F.M., Islamov K.F. Informacionnoe modelirovanie stroitel’stva [Information Modeling of Construction], *Stroitel’noe proizvodstvo [Construction production]*, 2020, no. 1, pp. 115–118. (In Russian)
7. GOST R 57678-2017 “Zelyonye” standarty. Ocenka ekologicheskoy effektivnosti zdaniya [“Green” standards. Assessment of the Environmental Efficiency of the Building], Moscow, Standartinform, 2017. (In Russian)
8. Röck M., et al. Embodied GHG Emissions of Buildings — The Hidden Challenge for Effective Climate Change Mitigation, *Applied Energy*, 2020, vol. 258, p. 114107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114107
9. Bilal M., et al. Big Data in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities, and Future Trends, *Advanced Engineering Informatics*, 2016, vol. 30, pp. 500–521. DOI: 10.1016/j.aei.2016.07.001
10. Rashev V.S., et al. Analiz vnedreniya tekhnologii informacionnogo modelirovaniya v Rossijskih stroitel’nyh kompaniyah po proektirovaniyu i stroitel’stvu inzhenernyh sistem [Analysis of the Implementation of Information Modeling Technology in Russian Construction Companies for the Design and Construction of Engineering Systems], *Vestnik Evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]*, 2020, no. 3. URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN320.pdf>. (In Russian)

Received: April 06, 2026

Accepted: May 11, 2026

Author’s information:

Kamil’ F. ISLAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; kam@kambox.ru

Liliya F. KAZANSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru



УДК 621.39

Имитационная модель процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E

Е. В. Опарин¹, Ф. А. Прошин², Е. В. Опарина²

¹ЗАО «Институт телекоммуникаций», Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, 5, корп. 5, лит. М

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

Для цитирования: Опарин Е. В., Прошин Ф. А., Опарина Е. В. Имитационная модель процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 503–515. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-503-515

Аннотация

Цель: разработать имитационную модель синхронизации часов в соответствии с протоколом точного времени (Precision Time Protocol, RTP), функционирующим в режиме Ent-to-End (E2E). Исследовать влияние вероятностно-временных параметров функционирования сетевых устройств RTP на точность синхронизации. **Методы:** анализ результатов исследований отечественных и зарубежных авторов и технической документации, имитационное моделирование с применением агентного подхода. **Результаты:** разработана имитационная модель синхронизации локальной шкалы времени с учетом схемы «точка — точка» с применением прозрачных часов. Получена оценка точности синхронизации в зависимости от вероятностно-временных характеристик влияющих подпроцессов. **Теоретическая значимость:** разработанная модель позволяет получать оценки достигаемой точности синхронизации при функционировании протокола RTP в режиме E2E в зависимости от характеристик используемых устройств, а также от характеристик каналов связи. Данная модель расширяет теоретическую базу в области синхронизации телекоммуникационных сетей. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при проектировании относительно небольших пакетных сетей с поддержкой RTP, что актуально в условиях предприятий, внедряющих средства промышленной автоматизации, на объектах энергетического комплекса, а также в различных системах управления, включая телекоммуникации. Также разработанные модели могут быть использованы при анализе работоспособности функционирующих локальных сетей для поиска наиболее значимых подпроцессов, которые влияют на качество предоставления услуг пользователям. При необходимости модель может быть в дальнейшем масштабирована для применения на сетях более сложной топологии и стать основой для формирования комплекса моделей синхронизации шкал времени с использованием RTP в различных режимах работы.

Ключевые слова: сетевая синхронизация, RTP, протокол точного времени, E2E, частотно-временное обеспечение, шкала времени

Введение

Протокол RTP представляет собой пакетно-ориентированный протокол, спроектированный для точной синхронизации распределенных часов с разрешением менее микросекунды и работающий в основном по Ethernet или IP.

Согласно стандарту IEEE Std 1588-2019 [1] протокол RTP обеспечивает точность синхронизации в сети выше 1 мкс (до 10 нс). Процесс функционирования протокола RTP основан на обмене сообщениями, передающими необходимую информацию в виде меток времени.

Функционирование протокола РТР может быть концептуально разделено на два этапа. На первом этапе устройства РТР логически самоорганизуются в иерархическое дерево синхронизации с использованием алгоритма ВМСА (Best Master Clock Algorithm). В сети связи устройства РТР постоянно обмениваются друг с другом качественными характеристиками своих внутренних часов. Устройство РТР с часами самого высокого качества в системе в конечном итоге берет на себя роль грандмастера (Grandmaster, GM) и выполняет функции источника времени для всей сети связи. На втором этапе осуществляется непрерывная передача меток времени от грандмастера вниз по иерархии устройств сети связи [1–4].

Протокол РТР поддерживает два механизма для расчета задержек в сети: сквозной (E2E) и одноранговый (Peer-to-Peer, P2P). Механизм

E2E требует, чтобы ведомое устройство измеряло общую задержку между собой и ведущим устройством. Механизм P2P, в свою очередь, требует, чтобы каждое устройство (включая коммутаторы и маршрутизаторы) на пути между ведущим и ведомым устройствами измеряло задержку между собой и своим непосредственным соседом. Общая сетевая задержка между ведущим и ведомым устройствами при этом равна сумме задержек канала на каждом участке и задержек на одноранговых устройствах на пути передачи. Синхронизация с использованием механизма E2E показана на рис. 1 [2, 5–8].

Фундаментальным допущением всех протоколов синхронизации, основанных на обмене временной информацией по сетям с неизвестными задержками распространения, является симметричная сетевая задержка между ведущим и ведомым устройствами.

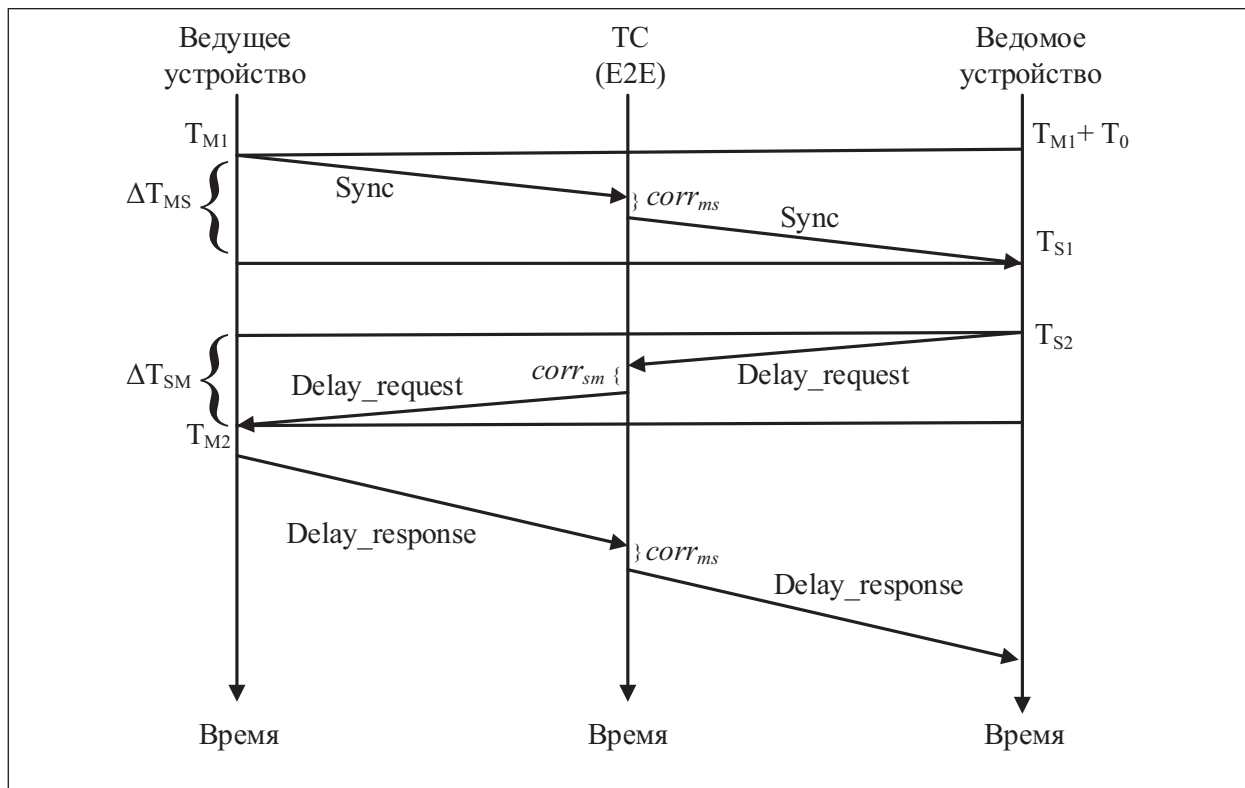


Рис. 1. Синхронизация с использованием механизма E2E

При использовании механизма E2E ведомое устройство вычисляет смещение своих часов по формулам (1, 2) и подстраивает свои часы в соответствии с вычисленным значением смещения [2, 9–12].

$$T_0 = T_s - T_M - d - \text{corr}_{ms}, \quad (1)$$

$$d = \frac{((T_{M2} - T_{M1}) - (T_{S2} - T_{S1})) - \text{corr}_{ms} - \text{corr}_{sm}}{2}, \quad (2)$$

где T_0 — смещение ведомых часов относительно ведущих часов;

T_M — время отправления сообщения “Sync”;

T_S — время прибытия сообщения “Sync”;

d — сетевая задержка между ведущим и ведомым устройствами;

corr_{ms} — значение задержки, которую прозрачные часы добавляют в поле коррекции “correctionField” сообщения “Sync”;

corr_{sm} — значение задержки, которую прозрачные часы добавляют в поле коррекции “correctionField” сообщения “Delay_request”.

При функционировании протокола RTP можно выделить два источника асимметрии задержки: разница во времени обработки сообщений прозрачными часами и задержка, которая возникает из-за разницы в скорости передачи или маршруте передачи. Негативные последствия первого вида асимметрии могут быть устранены при должной настройке оборудования, однако влияние второго вида асимметрии компенсировать значительно сложнее.

Отметим, что в условиях значительного масштаба протяженных телекоммуникационных систем точность доставки сигналов единого времени на основе протокола RTP может снижаться, так как значительно возрастает вариация задержки — IP Packet Delay Variation (IPDV) [12–14].

Построение имитационной модели процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E

В соответствии с процессом функционирования протокола RTP в режиме E2E (рис. 1) в среде AnyLogic была построена имитационная модель (рис. 2), где представлены ведущие

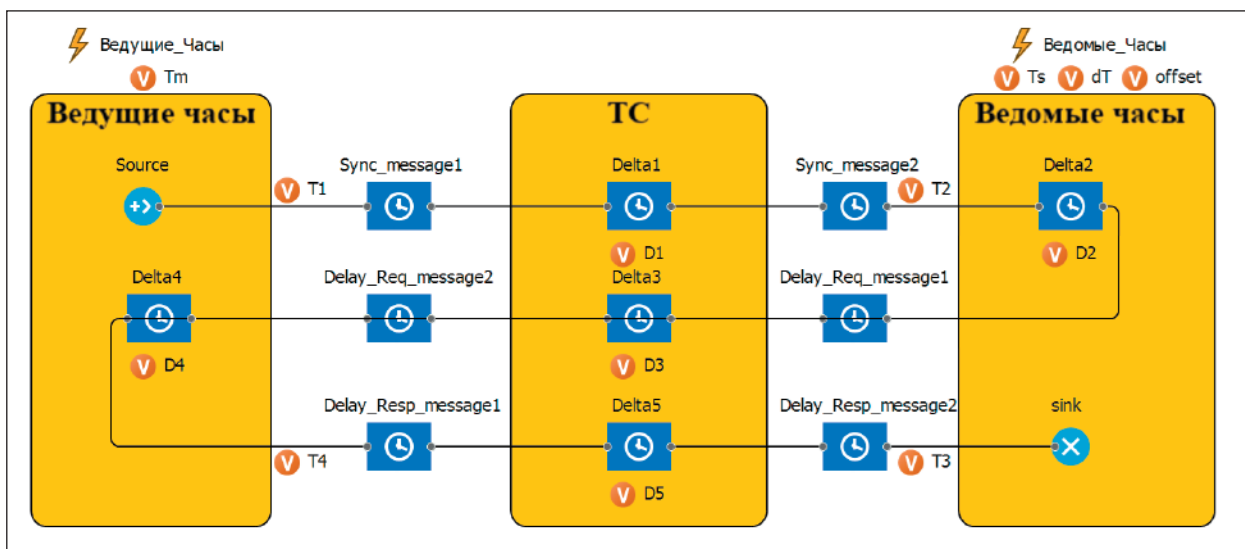


Рис. 2. Имитационная модель процесса функционирования протокола RTP с использованием механизма E2E

часы, ведомые часы и прозрачные часы (ТС), функционирующие в режиме E2E. Подстройка ведомых часов определяется отправкой и приемом сообщений “Sync”, “Delay_request” и “Delay_response”. Данные сообщения распространяются по каналу связи, представленному на имитационной модели блоками “Delay”. В общем случае задержки в каналах связи могут быть различными, а сам канал связи может быть симметричным или асимметричным. Обработка передаваемых сообщений в данных устройствах RTP и соответствующие ей задержки также представлены блоками “Delay”. Ведущие и ведомые часы характеризуются своей шкалой времени. Значения времени ведущих и ведомых часов отражаются в переменных T_m и T_s . Примем изначально, что ведомые часы опережают ведущие на 100 мкс [1, 2, 15]. Значение времени задержки обработки сообщений RTP задаются с помощью переменных D1, D2, D3, D4, D5. Назначение переменных T1, T2, T3, T4 — запись меток времени.

Для проведения моделирования примем, что канал связи является симметричным с нормальным распределением времени задержек

со следующими характеристиками (табл. 1). В результате проведенного моделирования получены следующие результаты (рис. 3–4).

По результатам проведенного моделирования построен график смещения ведомых часов от ведущих часов с учетом поправок по RTP, а также гистограмма отклонений показаний ведомых часов от показаний ведущих часов. График смещения ведомых часов относительно ведущих демонстрирует точность привязки локальной шкалы времени при функционировании протокола RTP в режиме E2E. Определено, что среднее смещение составляет $T_0 = 0,064$ мкс, минимальное — $T_{\min} = -3,947$ мкс (в данном случае ведомые часы спешат), а максимальное — $T_{\max} = 4,17$ мкс (в данном случае ведомые часы отстают).

Разработанная имитационная модель процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E отличается учетом характеристик применяемых устройств и применяемых каналов связи и позволяет оценивать точность привязки шкал времени. Использование реальных исходных данных, взятых из практики эксплуатации сетей связи, позволит получить модель с реальными свойствами, производить оценку

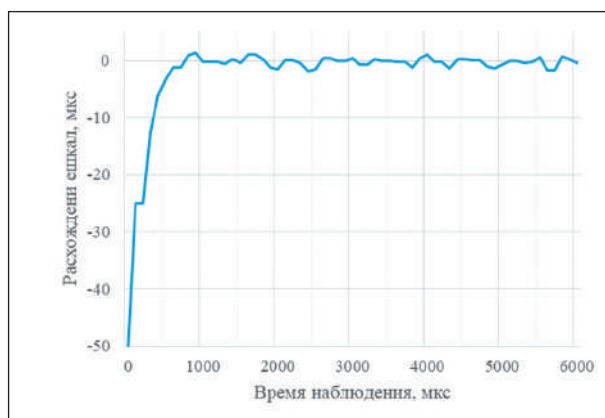


Рис. 3. Смещение ведомых часов от ведущих часов с учетом поправок по RTP

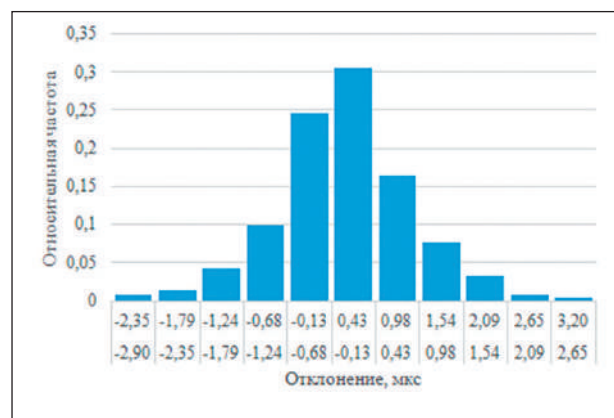















Рис. 4. Гистограмма отклонений показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок RTP

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для моделирования РТР в режиме E2E

Название состояния	Условное обозначение		Значение задержки, мкс
Инициирование цикла синхронизации	Source		—
Канал M_TC_1	Sync_message_1		Нормальный закон распределения с параметрами: $\delta = 0,5$; $\mu = 10$
Канал TC_M	Delay_Req_message_2		
Канал M_TC_2	Delay_Resp_message_1		
Задержка времени TC1	Delta_1		Экспоненциальный закон распределения с параметром $\lambda = 1$
Задержка времени TC2	Delta_3		
Задержка времени TC3	Delta_5		
Канал TC_S_1	Sync_message_2		Нормальный закон распределения с параметрами $\delta = 0,5$; $\mu = 8$
Канал S_TC	Delay_Req_message_1		
Канал TC_S_2	Delay_Resp_message_2		
Задержка времени S	Delta_2		Экспоненциальный закон распределения с параметром $\lambda = 1$
Задержка времени M	Delta_4		
Завершение цикла синхронизации	Sink		—

Примечание: экспоненциальный закон с параметрами (λ ; min) в AnyLogic следует понимать как случайную величину, распределенную по экспоненциальному закону с параметром λ , функция распределения которой смещена на величину min от начала координат.

и прогнозировать точность привязки шкал времени на реальных сетях связи, а при наложении нормативных требований на точность привязки обоснованно формировать предложения по составу и характеристикам применяемого оборудования.

Оценка процесса функционирования протокола RTP в режиме E2E от характеристик каналов связи, выраженных через вероятностные распределения времени задержек

Построенная модель (рис. 2) позволяет проводить оценку влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP. Для оценки влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP была проведена серия экспериментов при различных параметрах распределений времени задержки в каналах связи и на оборудовании [1, 2, 15]:

$\sigma_1 = 1; \sigma_2 = 1,5; \sigma_3 = 2,5$ (эксперимент 1, 2, 3);
 $\lambda_1 = 0,5; \lambda_2 = 2; \lambda_3 = 5$ (эксперимент 4, 5, 6).

Характеристики каналов связи заданы в соответствии с исходными данными согласно табл. 2. По итогам моделирования были получены следующие результаты (рис. 5–7). Оценка проводилась путем многократной итерации исходного эксперимента.

Сравнение результатов экспериментов по оценке влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP в режиме E2E приведено в табл. 3.

При исследовании канала с нормальным распределением задержки (рис. 5) показано: при $\sigma = 1$ точность находится в пределах 1,2 мкс, а с увеличением до значения $\sigma = 2,5$ достигает 6 мкс, что неприемлемо с точки зрения требований большинства потребителей. Канал с экспоненциальным распределением (рис. 6) на

множестве рассматриваемых значений параметра λ также оказывает влияние на достигаемую точность синхронизации, например, при $\lambda = 2$ наблюдается наименьшее отклонение — менее 1 мкс. Следовательно, чем более «тяжелый» хвост наблюдается у кривой распределения, тем меньшая точность достигается.

На гистограммах распределения точности синхронизации (рис. 7) показано, что отклонение часов, в общем, носит одномодальный характер и стремится к нормальному закону. Также можно заметить, что математическое ожидание находится вблизи нулевой отметки, но среднеквадратическое отклонение (СКО) меняется в широких пределах, что в конечном итоге сказывается на точности синхронизации. Например, в эксперименте 5 наблюдается более явная мода и наименьшее СКО, в результате чего достигаемая точность (рис. 6) наиболее высока в данной серии экспериментов. Относительно экспериментов 1, 2, 3 аналогично видно, что в соответствии с гистограммой рис. 7а точность при $\sigma = 1$ получается наибольшей.

Построенная модель может быть применена на реальных сетях связи для оценки отклонения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок RTP при наличии информации об используемых каналах связи. При этом полученные результаты позволяют дать оценку закона распределения отклонения шкалы ведомых часов от ведущих. При помощи варьирования параметров распределения задержки в канале возможно смоделировать условия различной загруженности канала, что имеет большое значение в условиях современных телекоммуникационных сетей.

Имея в наличии информацию о распределении времени задержек в каналах связи, которая может быть получена из статистики по

ТАБЛИЦА 2. Исходные данные для проведения оценки влияния качества и характеристик каналов связи на процесс функционирования протокола RTP в режиме E2E












Название состояния	Условное обозначение		Значение задержки в каналах связи, мкс						
			эксперимент 1	эксперимент 2	эксперимент 3	эксперимент 4	эксперимент 5	эксперимент 6	
Канал M_TC_1	Sync_message_1		normal (1; 10)			normal (1; 10)			
Канал TC_M	Delay_Req_message_2		normal (1,5; 10)	normal (2,5; 10)					
Канал M_TC_2	Delay_Resp_message_1								
Задержка времени TC1	Delta_1								
Задержка времени TC2	Delta_3								
Задержка времени TC3	Delta_5								
Канал TC_S_1	Sync_message_2								
Канал S_TC	Delay_Req_message_1		normal (1; 8)	normal (1,5; 8)	normal (2,5; 8)				
Канал TC_S_2	Delay_Resp_message_2								
Задержка времени S	Delta_2								
Задержка времени M	Delta_4								

ТАБЛИЦА 3. Сравнение результатов экспериментов

Вид распределения времени задержки в каналах связи	Отклонение показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок РТР, мкс			
	минимальное	среднее	максимальное	СКО
Эксперимент 1	-3,947	0,064	4,170	1,197
Эксперимент 2	-5,092	0,092	4,489	1,514
Эксперимент 3	-6,904	0,546	7,432	2,307
Эксперимент 4	-5,894	0,108	6,315	1,432
Эксперимент 5	-1,970	0,030	2,090	0,600
Эксперимент 6	-1,730	0,030	1,490	0,510

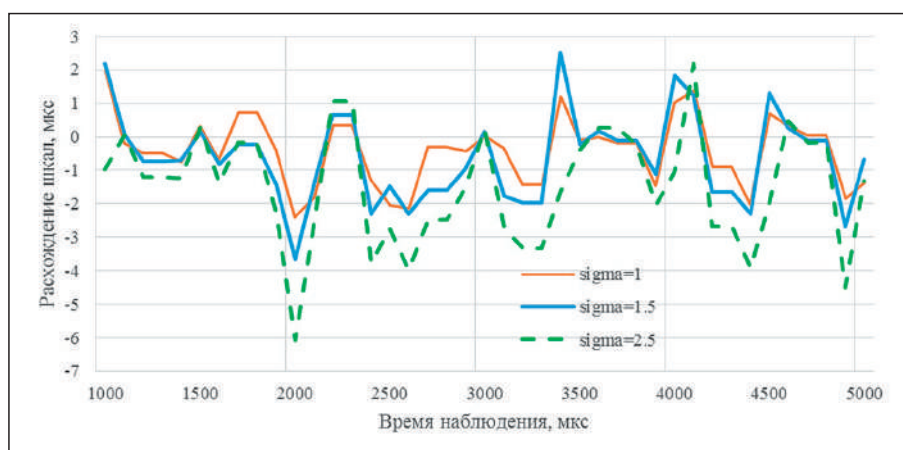
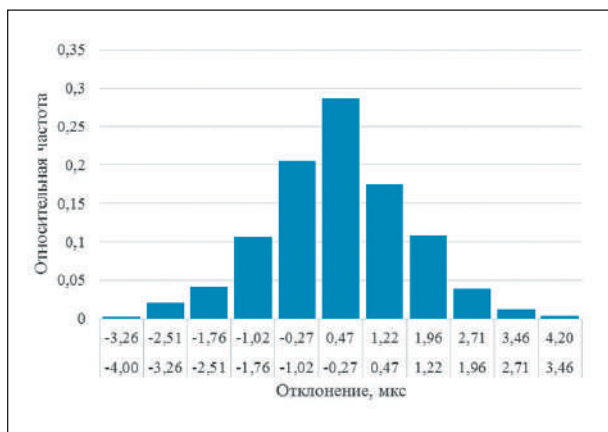


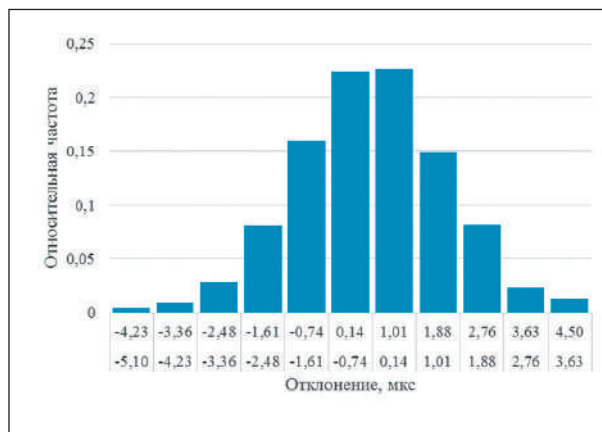
Рис. 5. Расхождение локальных шкал времени ведущих и ведомых часов по результатам экспериментов 1, 2, 3



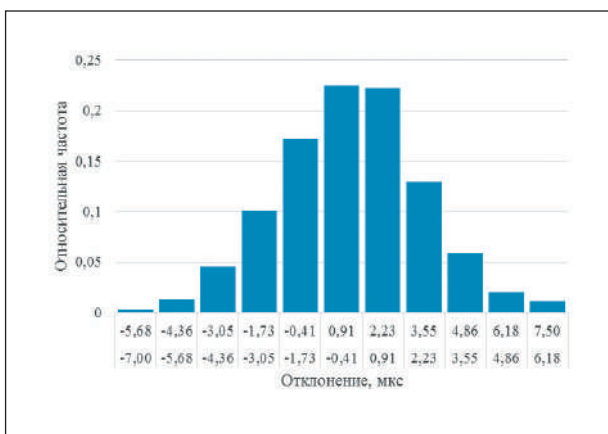
Рис. 6. Расхождение локальных шкал времени ведущих и ведомых часов по результатам экспериментов 4, 5, 6



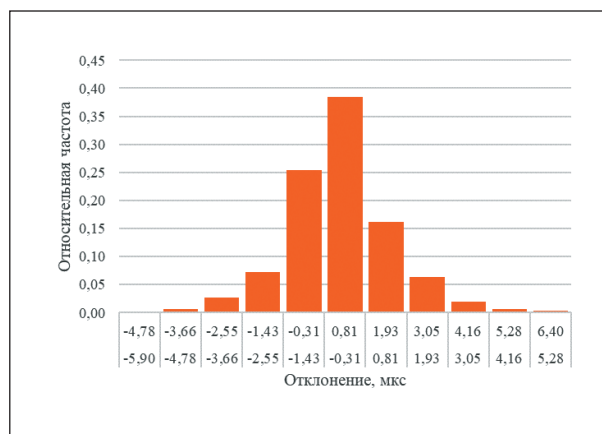
а) эксперимент 1



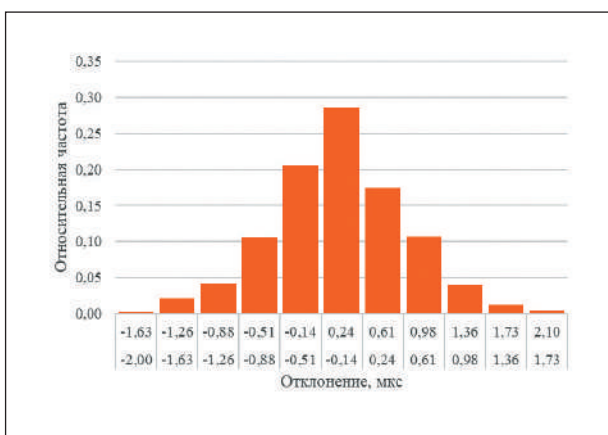
б) эксперимент 2



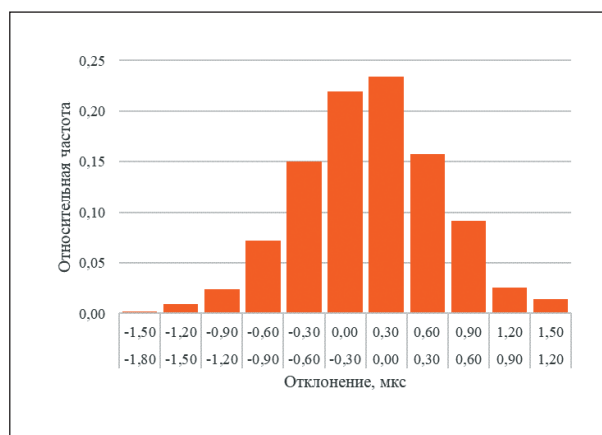
в) эксперимент 3



г) эксперимент 4



д) эксперимент 5



е) эксперимент 6

Рис. 7. Гистограммы отклонений показаний ведомых часов от показаний ведущих часов с учетом поправок РТР

технической эксплуатации, возможно оценить вариацию задержки передачи меток времени на реальных сетях связи. Это важно по двум причинам: моделирование показало, что при разных распределениях отклонение показаний ведомых часов от показаний ведущих часов существенно различается, а наличие длинных цепочек распределения шкал времени требует суммирования времени задержек, что и приведет к существенной ошибке предварительных оценок, если не учтено распределение времени задержки в канале связи.

Также возможно решить обратную задачу: исходя из требований ко времени отклонения показаний ведомых часов можно предъявить требования к каналам связи, в том числе и распределению времени задержек, чтобы отклонение показаний ведомых часов не превышало заданное.

Заключение

В данной статье разработан комплекс имитационных моделей процесса функционирования протокола РТР в режиме E2E, позволяющих оценить качество синхронизации ведомых часов. В качестве критерия эффективности процесса функционирования протокола РТР было выбрано время отклонения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов.

Для оценки отклонения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов был проведен ряд экспериментов при различных распределениях времени задержек в каналах связи и времени обработки сообщений в устройствах (нормальное и экспоненциальное), который показал, что наибольший разброс отклонений наблюдается при нормальном распределении времени задержек.

Построенные модели могут быть применены на реальных сетях связи для оценки откло-

нения показаний ведомых часов от показаний ведущих часов при наличии информации об используемых каналах связи и времени задержек в устройствах.

Имея в наличии информацию о распределении времени задержек в каналах связи и используемых устройствах, возможно оценить отклонение показаний ведомых часов на реальных сетях связи. Также возможно решить обратную задачу, которая заключается в том, что исходя из требований ко времени отклонения показаний ведомых часов можно предъявить требования к каналам связи и к применяемым устройствам, чтобы отклонение времени не превышало заданное.

Моделирование процесса функционирования протокола РТР необходимо для изучения его эффективности и особенностей его функционирования в различных приложениях, где требуется точная синхронизация времени. Построенные модели позволяют оценить, как работает протокол РТР в различных условиях, что может быть актуально для разработки и оптимизации систем, требующих точной синхронизации времени. Например, при разных распределениях времени задержек в каналах связи и в применяемых устройствах отклонение показаний ведомых часов может существенно различаться, что накладывает ограничение на построение длинных цепочек распределения шкал времени.

Список источников

1. IEEE 1588-2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
2. Waldhauser S., Jaeger B., Helm M. Time Synchronization in Time-Sensitive Networking // Network Architectures and Services. 2020. Pp. 51–56.
3. Dhiman D. C. NextGen Network Synchronization. Springer, 2021. 175 p.

4. Research on High-accuracy Clock Synchronization Based on IEEE 1588 Protocol / F. Shan [et al.] // 2019 IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). 2019. Pp. 343–347.
5. An Enhanced Method for Nanosecond Time Synchronization in IEEE 1588 Precision Time Protocol / F. Li [et al.] // Processes. 2023. Vol. 11 (5). P. 17.
6. Novel Re-synchronization Circuit to Enable High-Accuracy PTP Timestamping / C. A. Shao [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024. P. 9.
7. Рыжков А.В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия — Телеком, 2021. 270 с.
8. Рыжков А. В., Шварц М. Л., Лоховин В. А. Перспективные направления развития систем связи и синхронизации сложных инфраструктурных объектов // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2024. Т. 18, № 11. С. 30–37.
9. Рыжков А. В., Шварц М.Л. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2020. Т. 14, № 2. С. 17–24.
10. Опарин Е.В. Функционирование системы частотно-временного обеспечения железнодорожного транспорта в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. М.: РИОР, 2025. 248 с.
11. Мазуренко Д.К. Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2017. Т. 11, № 8. С. 4–8.
12. Мазуренко Д.К., Пальцин Д.А., Фень А.С. Эксплуатация оборудования системы синхронизации сигналов в сетях, построенных на технологии коммутации пакетов, и в сетях 5G // Электросвязь. 2022. № 12. С. 14–17.
13. Опыт внедрения систем частотно-временного обеспечения сетей связи / М. Л. Шварц [и др.] // T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. 2022. Т. 16, № 7. С. 21–28.
14. Прошин, Ф.А., Сторожук М. Н., Сторожук Н.Л. Методы синхронизации в сетях связи // Первая миля — last mile. 2024. № 2 (118). С. 62–69.
15. Бунцев И.А. Создание и реализация имитационных моделей в программной среде AnyLogic. М.: Горячая линия — Телеком, 2016. 154 с.

Дата поступления: 30.01.2026

Решение о публикации: 04.03.2026

Контактная информация:

ОПАРИН Евгений Валерьевич — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрическая связь»; Oparin@mail.ru

ПРОШИН Федор Алексеевич — кандидат техн. наук, ассистент; fedorproshin@gmail.com

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — кандидат техн. наук, доцент; syrayaekaterina@mail.ru

Simulation Model of the PTP Protocol Operation in E2E Mode

E. V. Oparin¹, F. A. Proshin², E. V. Oparina²

¹JSC “Institute of Telecommunications”, lit. M, build. 5, 5 Kantemirovskaya str., St. Petersburg, 194100, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Oparin E. V., Proshin F. A., Oparina E. V. Simulation model of the PTP protocol operation in E2E mode // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 503–515. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-503-515 (In Russian)

Abstract

Purpose: to develop a simulation model of clock synchronization in accordance with the Precision Time Protocol (PTP) functioning in «End-to-End» (E2E) mode. To investigate the influence of probabilistic-temporal parameters of network devices operation on synchronization accuracy. **Methods:** an analysis of foreign and Russian authors' works and technical documentation, simulation modeling using an agent-based approach. **Results:** a simulation model of local time scale synchronization via PTP with transparent clock is developed. An estimation of synchronization accuracy are obtained depending on the influencing subprocesses. **Theoretical significance:** the developed model makes it possible to obtain the estimation of the achieved synchronization accuracy when PTP is operating in E2E mode depending on the characteristics of the devices that are used, as well as on the characteristics of the communication channels. **Practical significance:** the obtained results can be used for designing relatively small packet networks with PTP support that is relevant in the context of implementing industrial automation tools at enterprises. The developed models can also be used for analyzing the operability of local area networks functioning to find the most significant subprocesses that affect the provisioned to users quality of service. The model can be further scaled for implementing in networks with more complicated topology and become a basis for complex of synchronization models of PTP working in different modes.

Keywords: Network synchronization, PTP, precision time protocol, E2E, frequency-time provision, time scale

References

1. IEEE 1588-2019 (07.11.2019). Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
2. Waldhauser S., Jaeger B., Helm M. Time Synchronization in Time-Sensitive Networking, Network Architectures and Services, 2020, pp. 51–56.
3. Dhiman D.C. Next Gen Network Synchronization, Springer, 2021, 175 p.
4. Shan F., et al. Research on High-accuracy Clock Synchronization Based on IEEE 1588 Protocol, 2019 *IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 2019, pp. 343–347.
5. Li F, et al. An Enhanced Method for Nanosecond Time Synchronization in IEEE 1588 Precision Time Protocol, *Processes*, 2023, vol. 11 (5), p. 17.
6. Shao C., Xu Zh., Harihara S.A. Novel Resynchronization Circuit to Enable High-Accuracy PTP Timestamping, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, p. 9.
7. Ryzhkov A.V. Chastotno-vremennoe obespechenie v setyakh elektrosvyazi: uchebnoe posobie dlya vuzov [Time-Frequency Support in Telecommunication Networks: A Textbook Handbook for Universities], Moscow, Hotline – Telecom, 2021, 270 p. (In Russian)
8. Ryzhkov A. V., Schwartz M. L., Lokhovin V.A. Perspektivnye napravleniya razvitiya sistem svyazi i sinkhronizatsii slozhnykh infrastrukturykh ob"ektov [Promising Directions for the Development of Communication Systems and Synchronization of Complex Infrastructure Facilities], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2024, vol. 18, no. 11, pp. 30–37. (In Russian)
9. Ryzhkov A. V., Schwartz M. L. Puti formirovaniya pretsizionnoj shkaly vremeni natsional'noj seti svyazi [Ways Formation of the Precision Time Scale of the National Communications Network], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 17–24. (In Russian)
10. Oparin E. V. Funktsionirovanie sistemy chastotno-vremennogo obespecheniya zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh vozdeystviya destabiliziruyushchikh faktorov [Functioning of the System of Frequency-Time Support of Railway Transport Under the Influence of Destabilizing

Factors], Moscow, RIOR Publishing Center LLC, 2025, 248 p. (In Russian)

11. Mazurenko D.K. Aspekty postroeniya sistemy chastotno-vremennoj setевой sinkhronizatsii signalov [Aspects of Building a Time-Frequency Network Signal Synchronization System], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 2017, vol. 11, no. 8, pp. 4-8. (In Russian)

12. Mazurenko D.K., Paltsin D.A., Fen' A.S. Ekspluatatsiya oborudovaniya sistemy sinkhronizatsii signalov v setyakh, postroennykh na tekhnologii kommutatsii paketov, i v setyakh 5G [Operation of Signal Synchronization System Equipment in Networks Based on Packet Switching Technology and in 5G Networks], *Elektrosvyaz' [Electrosvyaz Magazine]*, 2022, no 12, pp. 14–17. (In Russian)

13. Ryzhkov A.V, et al. Opyt vnedreniya sistem chastotno-vremennogo obespecheniya setej svyazi [Experience in Implementing Systems Time-Frequency Support of Communication Networks], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm – Telecommunications and Transport]*, 2022, vol. 16, no. 7, pp. 21–28. (In Russian)

14. Proshin, F. A., Storozhuk M. N., Storozhuk N.L. Metody sinkhronizatsii v setyakh svyazi [Methods of Synchronization in Communication Networks], *Pervaya milya — last mile [The First Mile — Last Mile]*, 2024, no. 2 (118), pp. 62–69. (In Russian)

15. Buntsev I.A. Sozdanie i realizatsiya imitatsionnykh modelej v programmnoj srede AnyLogic [Creation and Implementation of Simulation Models in the Anylogic Software Environment], Moscow, *Goryachaya liniya — Telekom [Hotline – Telecom]*, 2016. 154 p. (In Russian)

Received: January 30, 2026

Accepted: March 04, 2026

Author's information:

Evgeny V. OPARIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Electrical Communications”; OnapuH@mail.ru

Fedor A. PROSHIN — PhD in Engineering, Assistant; fedorproshin@gmail.com

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor; syrayaekaterina@mail.ru

УДК 004.056.2

Модель процесса анализа сетевой активности элементов телефонной IP-сети комплексом компьютерной разведки нарушителя

А. А. Привалов^{1, 3}, Д. Д. Титов^{1, 2}

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

² ОАО «Супертел», Россия, 197046, Санкт-Петербург, Петроградская наб., 38

³ Академия войск национальной гвардии, Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Л. Пилутова, 1

Для цитирования: Привалов А. А., Титов Д. Д. Модель процесса анализа сетевой активности элементов телефонной IP-сети комплексом компьютерной разведки нарушителя // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 516–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-516-530

Аннотация

Цель: разработка и анализ стохастической модели процесса анализа сетевой активности элементов телефонной IP-сети, выполняемого комплексом компьютерной разведки (КР) нарушителя, для количественной оценки временных характеристик разведывательного цикла. **Методы:** алгоритм работы сетевого сканера представлен в виде стохастической сети (GERT-модели), где этапы обнаружения активных элементов, определения ролей узлов, типов операционных систем, портов/сервисов и анализа уязвимостей описываются дугами со своими функциями распределения времени и вероятностями успеха, а повторные запуски — петлями возврата. Для ветвей «Роль», ОС и «Порты/сервисы» получены эквивалентные изображения по Лапласу плотностей распределения, на основе которых выведены эквивалентные функции для параллельного блока и полного цикла работы сканера в режимах полного и частичного сканирования. Интегральная функция распределения, среднее время и уровень требований рассчитываются на основе полученных аналитических выражений. **Результаты:** получены компактные формулы для эквивалентной функции, функции распределения и среднего времени разведки VoIP-сети в зависимости от вероятностей успешного выполнения ключевых операций. Показано, что временные характеристики процесса имеют выраженную нелинейную зависимость от значения этих вероятностей: при их увеличении наблюдается многократное сокращение среднего времени и срока успешного завершения сканирования. Сравнение режимов полного и частичного сканирования демонстрирует ожидаемый компромисс между полнотой добываемой компьютерной разведкой информации и скоростью получения результатов. **Практическая значимость:** модель позволяет прогнозировать временные показатели работы комплекса КР в VoIP-сети, выявлять узкие места, а также количественно оценивать влияние архитектуры сети и параметров средств защиты на скорость получения нарушителем критически важной информации, что дает основу для обоснованного выбора мер по повышению киберустойчивости.

Ключевые слова: телефонная IP-сеть, комплекс компьютерной разведки, сетевой сканер, анализ сетевой активности, стохастическая сеть, GERT-модель, эквивалентная функция, полное и частичное сканирование

Введение

Телефонная IP-сеть в современных корпоративных и ведомственных инфраструктурах

перестала быть узкоспециализированным голосовым сегментом. Она стала частью единой информационно-телекоммуникационной

среды, обеспечивающей критичные для управления и производственного цикла сервисы — от сигнализации и диспетчеризации до интеграции с прикладными системами, системами мониторинга и корпоративными каталогами. Переход к пакетной передаче речи и сигнализации, использование стандартных стеков TCP/IP и широкая номенклатура протоколов (SIP/RTP, H.323, MGCP, HTTP(S), SNMP, SSH и др.) объективно повышают функциональные возможности сети, но и одновременно расширяют поверхность атаки. В этих условиях ключевым фактором киберустойчивости становится не только наличие средств защиты на периметре и внутри сегментов, но и способность оператора оценить, с какой скоростью и полнотой нарушитель может построить модель сети, идентифицировать роли ее элементов, определить типы операционных систем и сервисов, а также перейти от разведки к эксплуатации уязвимостей.

На практике действия нарушителя редко представляют собой единичный акт сканирования. Компьютерная разведка (КР) — это управляемый многоэтапный процесс, в котором отдельные процедуры запускаются последовательно и параллельно, повторяются при сбоях, адаптируются к текущему состоянию сети и политике фильтрации. Сетевая активность нарушителя, как правило, включает:

- подключение к целевой ИТКС (или вход в сегмент через компрометированный узел);
- первичное выявление активных элементов;
- последующую классификацию узлов по функциональным ролям;
- определение типов ОС и версий стеков;
- перечисление портов и сервисов;
- корреляцию наблюдений с базами уязвимостей;
- формирование отчета и принятие решения о дальнейших действиях.

Существенная особенность телефонной IP-сети заключается в том, что часть ее элементов и сервисов обладает динамической природой (перерегистрация терминалов, NAT-трансляция, кластеризация call-серверов, балансировка, резервирование), а также имеет выраженную неоднородность по уровню защищенности (ядро/агрегация/доступ, серверные узлы, пограничные шлюзы, абонентские терминалы). Это приводит к тому, что время разведывательного цикла и вероятность успеха отдельных операций становятся случайными величинами, зависящими от архитектуры сети, конфигурации средств защиты, режимов мониторинга, уровня противодействия и многих других факторов.

Несмотря на очевидную практическую значимость, количественная оценка временных характеристик разведки в отношении телефонных IP-сетей часто выполняется упрощенно: либо на уровне детерминированных нормативов и экспертных оценок, либо с использованием сильно упрощенных моделей без явной аналитической связи между параметрами этапов и интегральными показателями процесса. Такие подходы затрудняют сравнение альтернативных архитектурных решений и защитных мер. Между тем именно такие вопросы непосредственно связаны с управлением рисками: временной выигрыш в пользу оператора означает дополнительный ресурс на обнаружение аномалий, реагирование и локализацию воздействия.

В настоящей статье предлагается стохастическая модель процесса анализа сетевой активности элементов телефонной IP-сети комплексом компьютерной разведки нарушителя, основанная на представлении этапов разведки в виде стохастической сети. В модели операции процесса (поиск активных элементов, определение роли узлов, идентификация

типов ОС, выявление сервисов и портов, анализ уязвимостей, формирование отчета) описываются дугами сети с заданными распределениями времени и вероятностями успешного завершения. Логика взаимодействия этапов реализуется вершинами — узлами сети, включая параллельные ветвления и синхронизацию по правилу логического «И», а также механизм повторных запусков процедур при сбоях. Такое представление позволяет перейти от качественного описания действий нарушителя к формальной модели, в которой интегральные функции распределения, математическое ожидание и дисперсия времени реализации моделируемого процесса выводятся из параметров базовых операций.

Цель работы заключается в разработке и аналитическом исследовании стохастической модели подсистемы сетевого сканирования как ядра процесса анализа сетевой активности, а также в получении выражений для вероятностно-временных характеристик полного цикла разведки.

Новизна работы состоит в том, что процесс анализа сетевой активности телефонной IP-сети рассматривается как связанный стохастический процесс с параллельными ветвями и механизмом повторов, а ключевые показатели времени разведки выводятся аналитически через эквивалентные функции, являющиеся изображением моделируемого процесса по Лапласу, и определяются моменты случайного времени реализации этого процесса.

Тем самым работа направлена на создание прикладного аппарата, позволяющего связать архитектуру и режимы защиты телефонной IP-сети с вероятностно-временными характеристиками компьютерной разведки нарушителя и использовать эту связь для обоснования организационно-технических решений по повышению устойчивости функционирования сети.

Постановка задачи

Пусть имеется телефонная IP-сеть. Процесс компьютерной разведки начинается с поэтапного обследования сети с использованием сетевого сканера, что позволяет нарушителю формировать представление о структурной связанности сети, а также о весах и ролях ее отдельных элементов. После подключения к телефонной IP-сети происходит определение ее активных элементов за некоторое время $t_{\text{элемент}}$ с функцией распределения $Q(t)$. В процессе работы сетевого сканера параллельно выполняются следующие операции:

1. Определение роли узлов сети за некоторое время $t_{\text{роль}}$ с функцией распределения $R(t)$. При успешном завершении данного этапа (а вероятность этого события равна P_1) каждому ранее обнаруженному активному элементу ставится в соответствие его функциональная роль на основе совокупности выявленных сервисов, открытых портов и характеристик обрабатываемого трафика.

2. Определение типов операционных систем на обнаруженных узлах за некоторое время $t_{\text{ОС}}$ с функцией распределения $D(t)$. Условная вероятность успешного определения типов ОС полагается равной P_2 .

3. Определение портов и предоставляемых сервисов на активных элементах за некоторое время $t_{\text{АС}}$ с функцией распределения $L(t)$. На этом этапе уточняется роль узлов в сети по совокупности запускаемых сервисов. Вероятность успешной реализации данного этапа равна P_3 .

Выполнение описанных выше этапов позволяет нарушителю определить сетевые уязвимости за некоторое время $t_{\text{уяз}}$ с функцией распределения $O(t)$. Таким образом реализуется структурированное описание ролей узлов, типов ОС и открытых портов с привязкой к выявленным уязвимостям.

Сбой на любом из перечисленных этапов приводит к повторному запуску процедуры сканирования за некоторое время $t_{\text{повтр.}}$ с функцией распределения $M(t)$. Успешное завершение работы сетевого сканера инициирует процесс обработки и агрегирования полученной информации. На этом заключительном этапе формируется отчет о структурной связанности сети, ролях ее элементов, типах эксплуатируемых операционных систем и выявленных уязвимостях.

Требуется определить функцию распределения $F(t)$ и среднее время \bar{T} успешной реализации нарушителем процесса КР.

Допущения и ограничения:

1. Доступность объектов опроса. DNS-сервер, пограничный маршрутизатор (RIP) и SNMP-агенты элементов телефонной IP-сети считаются доступными для сетевого сканера в пределах выбранной области наблюдения; сетевые ответы трактуются как «получен / не получен» (успех/неудача) в рамках принятой вероятностной схемы.

2. Независимость параллельных подпроцессов. Время реализации частных процессов

считается независимыми случайными величинами. Взаимодействия через общие ресурсы, а также корреляции задержек в базовой постановке не учитываются.

3. Стационарность параметров. Параметры распределений $L(t), N(t), O(t), M(t)$ и вероятности $P_i, i = \overline{1,3}$ предполагаются постоянными на интервале анализа.

Решение

Описанный в постановке задачи процесс работы комплекса компьютерной разведки представлен в виде стохастической сети (рис. 1).

Функции распределения времени реализации частных этапов имеют вид:

$$R(t) = 1 - e^{-rt}; D(t) = 1 - e^{-dt}; L(t) = 1 - e^{-lt};$$

$$O(t) = 1 - e^{-ot}; Q(t) = 1 - e^{-qt}; M(t) = 1 - e^{-mt};$$

где $R = \frac{1}{t_a}; L = \frac{1}{t_b}; O = \frac{1}{t_c}; Q = \frac{1}{t_g}; M = \frac{1}{t_{\text{повт.}}}$

$t_a, t_b, t_c, t_d, t_g, t_{\text{повт.}}$ — среднее время k -го процесса работы комплекса КР.

Для аналитического вывода далее используется редуцированная модель, в которой

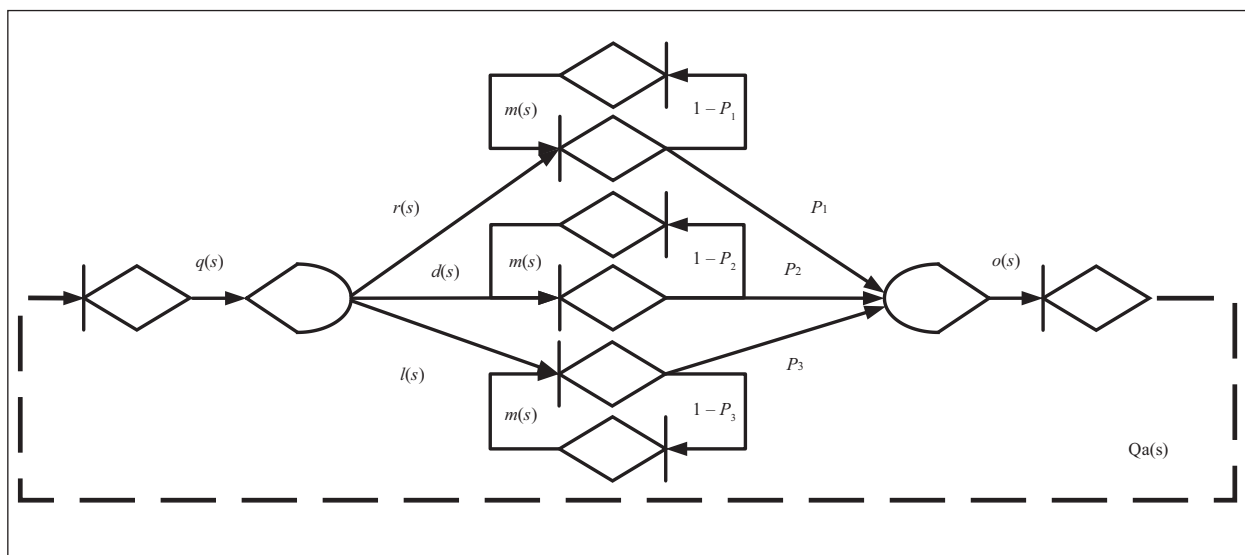


Рис. 1. Стохастическая сеть работы сетевого сканера

ключевым элементом является параллельный узел логического «И» с тремя ветвями: $r(s)$, $d(s)$, $l(s)$. Входной и выходной участки представлены последовательными блоками $q(s)$ и $o(s)$ (рис. 2).

Пусть T_R , T_D , T_L , — независимые значения времени реализации ветвей. Для логического «И» момент реализации узла:

$$T = \max\{T_R; T_D; T_L\}. \quad (1)$$

Тогда функция распределения времени реализации узла «И» равна произведению функций распределения времени реализации ветвей:

$$F_3(t) = 1 - e^{-rt} - e^{-dt} - e^{-lt} + e^{-(r+d)t} + e^{-(r+l)t} - e^{-(l+r+d)t}, t \geq 0. \quad (2)$$

Плотность распределения:

$$f_3(t) = \frac{d}{dt} F_3(t) = re^{-rt} + de^{-dt} + le^{-lt} - (r+d)e^{-(r+d)t} - (r+l)e^{-(r+l)t} - (l+d)e^{-(l+d)t} + (l+r+d)e^{-(l+r+d)t}, t \geq 0. \quad (3)$$

После получения явного выражения для плотности $f_3(t)$, которая описывает время реализации узла «И» для трех ветвей, для удобства последующих расчетов ее целесообразно аппроксимировать гамма-распределением. Выбор гамма-распределения обусловлен тем, что при моделировании систем массового обслуживания погрешность аппроксимации функций распределения вре-

мени свершения целевых процессов оказывается достаточно малой [11]. Кроме того, данный вид распределения является встроенной функцией в абсолютном большинстве пакетов прикладных программ, широко используемых при моделировании систем и процессов.

Для определения параметров аппроксимирующего $f_3(t)$ распределения определим параметры формы и масштаба:

$$M_{f_3}^1 = E[T_\Delta]; M_{f_3}^2 = E[T_\Delta^2]; \quad (4)$$

$$D_{f_3} = M_{f_3}^2 - (M_{f_3}^1)^2.$$

$$\alpha_3 = \frac{(M_{f_3}^1)^2}{D_{f_3}}; \mu_3 = \frac{M_{f_3}^1}{D_{f_3}}. \quad (5)$$

Таким образом, фрагмент стохастической сети, соответствующий логической операции «И», характеризуется изображением неполной гамма-функции:

$$f_3(s) \approx \gamma_3 = \left(\frac{\mu_3}{\mu_3 + s} \right)^{\alpha_3}, s \geq 0. \quad (6)$$

На рис. 3 показано сопоставление функции распределения времени реализации логического узла «И» и аппроксимирующего ее гамма-распределения. Видно, что функции практически совпадают, а максимальное отклонение не превышает 3%. Следовательно, аппроксимация узла «И» гамма-распределением по двум

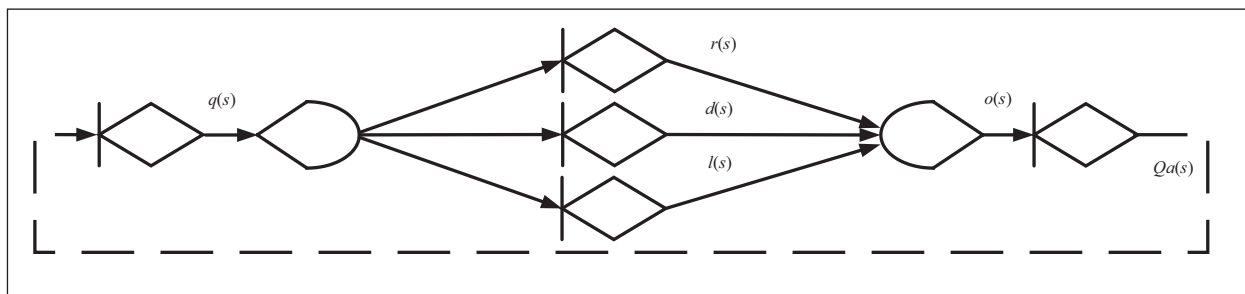


Рис. 2. Редуцированная стохастическая сеть: последовательное соединение входного блока, узла «И» (три параллельные ветви) и выходного блока

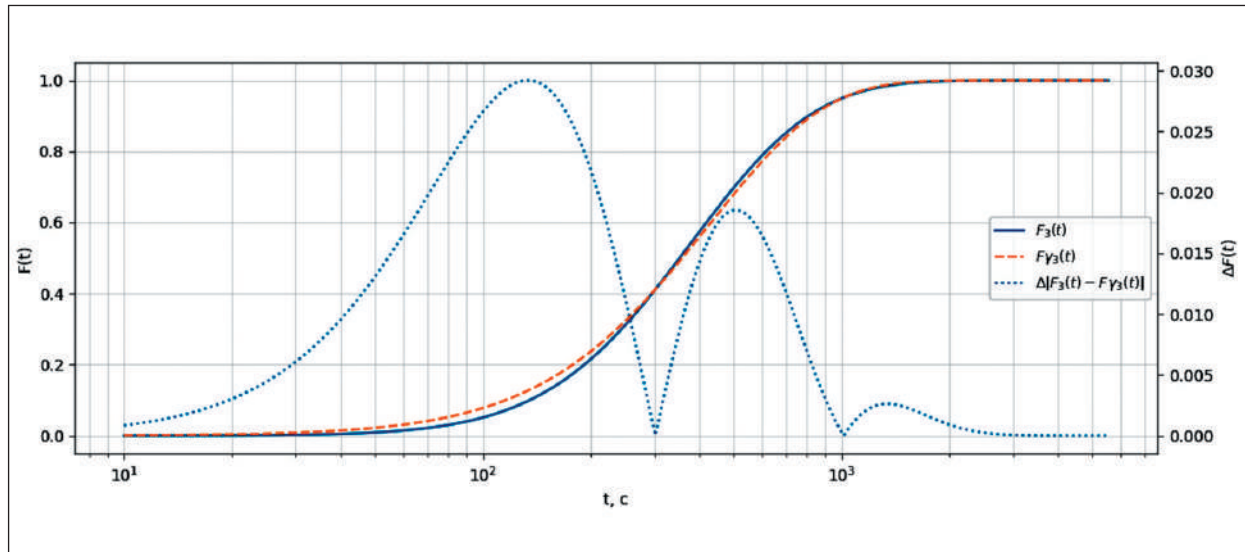


Рис. 3. Графики функции распределения времени реализации логического узла «И» и аппроксимирующего гамма-распределения

моментам обеспечивает компактную инкапсуляцию при умеренной погрешности, которая далее переносится на эквивалентную модель подсети и должна учитываться при оценке суммарного времени завершения.

Результат (6) позволяет преобразовать исходную стохастическую сеть к виду (рис. 4) и получить ее эквивалентную функцию (7):

$$Q_a(s) = \frac{q}{q+s} \cdot \frac{o}{o+s} \cdot \left(\frac{\mu_3}{\mu_3+s} \right)^{\alpha_3}. \quad (7)$$

Эквивалентная функция $Q_a(s)$ является изображением по Лапласу плотности времени свершения всего процесса компьютерной разведки. Для дальнейшего анализа определим первый и второй начальные моменты случайного времени свершения процесса, а затем итоговую функцию распределения.

Используя стандартные соотношения для начальных моментов:

$$E[T] = -\left. \frac{dQ_a(s)}{ds} \right|_{s=0}; E[T^2] = -\left. \frac{d^2Q_a(s)}{ds^2} \right|_{s=0}, \quad (8)$$

определим дисперсию времени реализации модельного процесса:

$$D[T] = E[T^2] - (E[T])^2. \quad (9)$$

Для получения интегральной функции распределения $F(t) = P(T \leq t)$ обозначим: α — параметр формы, β — параметр масштаба. Тогда при

$$E[T] = \mu^{-1}; D[T] = \sigma^2, \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\mu^{-2}}{\sigma^2}; \beta = \frac{\mu^{-1}}{\sigma^2} \quad (11)$$

искомая функция распределения времени успешного выполнения задачи компьютерной разведки, выполняемой сетевым сканером, определяется как:

$$Q_a(t) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} e^{-\beta t} dt, \quad (12)$$

равно:

$$T = \int_0^\infty t d[Q_a(t)] = \frac{\alpha}{\beta}. \quad (13)$$

Таким образом, поставленная задача решена.

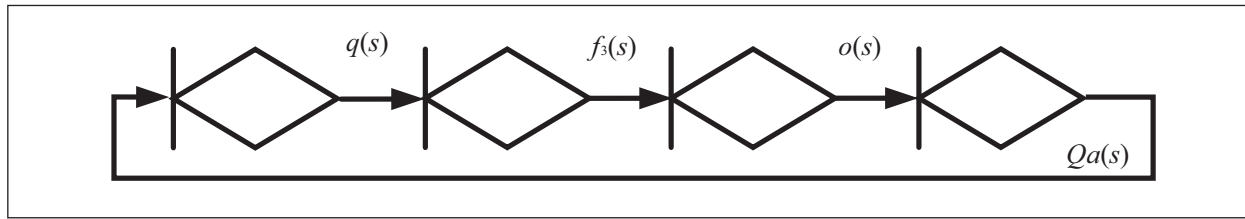


Рис. 4. Приведение редуцированной сети к последовательной структуре: $q(s) - f_3(s) - o(s)$ и формирование эквивалентной функции $Q_a(s)$

Пример расчета

В качестве исходных данных используются следующие значения времени и вероятности, соответствующие профильной полной модели процесса анализа сетевой активности элементов:

$$\begin{aligned} t_{OC} &= 360 \text{ с}, t_{\text{элемент}} = 200 \text{ с}, t_{AC} = 230 \text{ с}, \\ t_{\text{уязв.}} &= 300 \text{ с}, t_{\text{роль}} = 320 \text{ с}, t_{\text{повт.}} = 210 \text{ с}, \\ P1 &= 0,5, P2 = 0,5, P3 = 0,5. \end{aligned}$$

На рис. 5 и 6 показаны функция распределения времени успешного выполнения задачи КР сетевым сканером и зависимость среднего времени реализации данного процесса от вероятности доступности телефонной IP-сети, под которой понимается вероятность такого события, когда нарушитель обладает аппаратными и программными средствами, обеспечивающими ему скрытое подключение к защищаемой сети.

Таким образом, при среднем уровне подготовки нарушителя — специалиста в области компьютерной разведки и невысокой вероятности доступности сети через 25,8 минуты телефонная IP-сеть будет вскрыта и нарушитель определит ее основные уязвимости.

Анализ полученных результатов

Предельная оценка минимального времени компьютерной разведки и влияние профиля сканера

на гарантированное завершение процесса

Минимально достижимое время реализации компьютерной разведки целесообразно

оценивать как предельную нижнюю границу процесса, соответствующую идеализированному случаю отсутствия сбоев и повторов, то есть при $P_i = 1$ для всех вероятностных этапов. В этом режиме строится эталонный график функции распределения $Q_a(t) = Pr\{T \leq t\}$, который задает наилучшую возможную динамику завершения: при любых $P_i < 1$ кривая $Q_a(t)$ неизбежно смещается влево, а вероятность завершения к моменту времени t оказывается не выше эталонной.

Для полного профиля операций в предельном случае $P_i = 1$ получены ориентиры: по среднему времени $T_{min} = \Sigma T_{min} = 16,5$ минуты и по уровню гарантированного завершения $t_{0,95} \approx 29,5$ минуты, что соответствует пересечению кривой распределения с прямой $Q_a(t) = 0,95$. Представленные графики позволяют проследить диапазоны времени для различных видов сканеров, задаваемые профилем применяемых операций (рис. 7). Укороченные профили обеспечивают более раннее достижение заданного уровня $Q_a(t)$, но формируют менее информативный результат; расширенные профили повышают обоснованность и точность местоопределения, однако увеличивают длительность процесса, что проявляется сдвигом кривых вправо и ростом $t_{0,95}$.

Показано, что усложнение профиля операций компьютерной разведки принципиально не может привести к сокращению времени добывания разведанных, нижняя граница которого соответствует лучшему времени «самого лучшего»

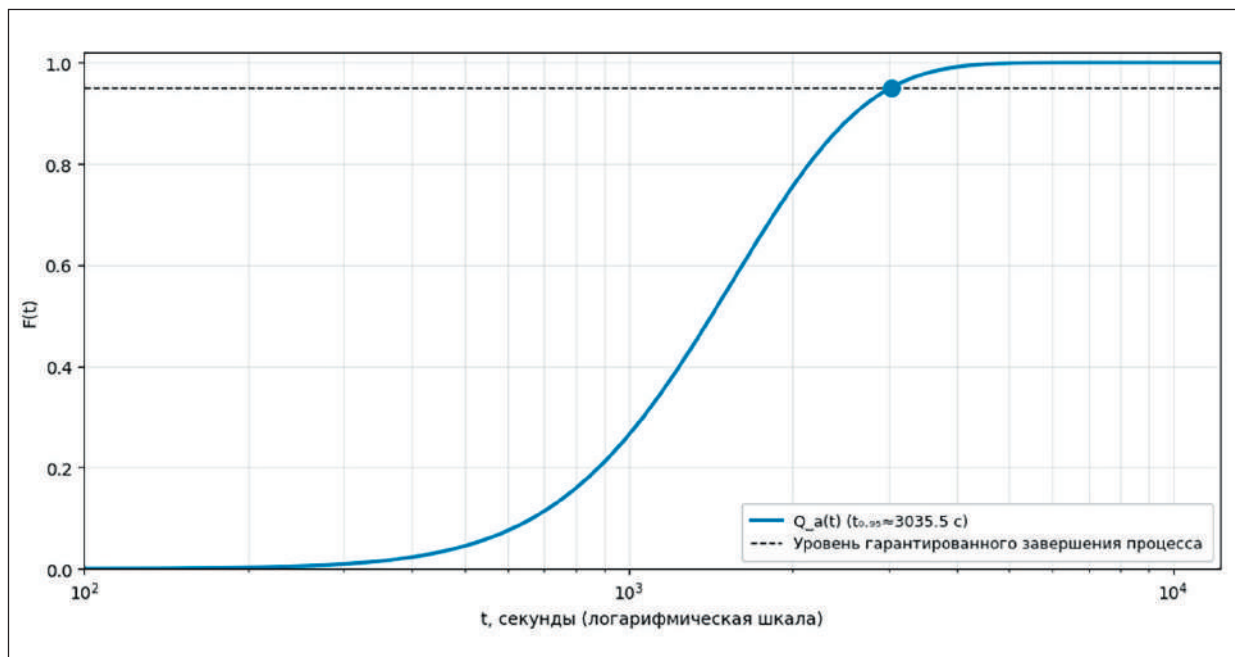


Рис. 5. Функция распределения времени успешного выполнения задачи КР сетевым сканером

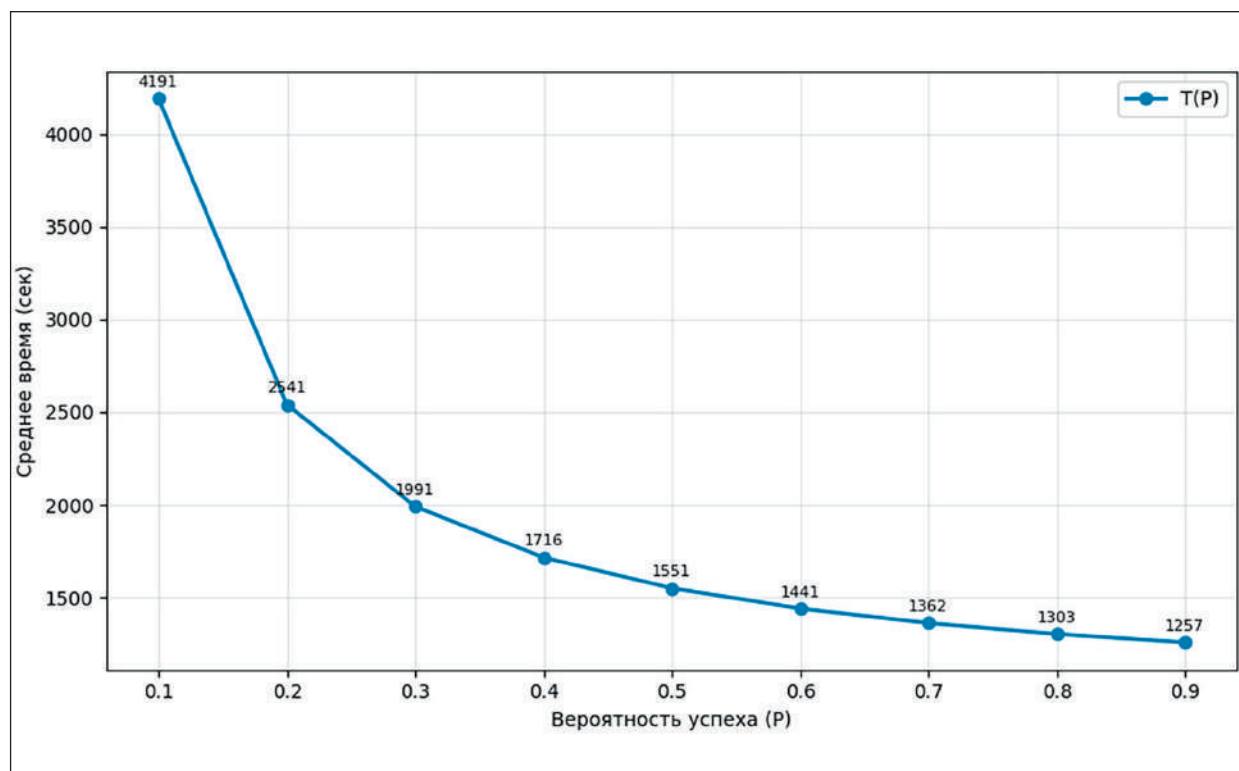


Рис. 6. График зависимости среднего времени реализации данного процесса от вероятности доступности телефонной IP-сети

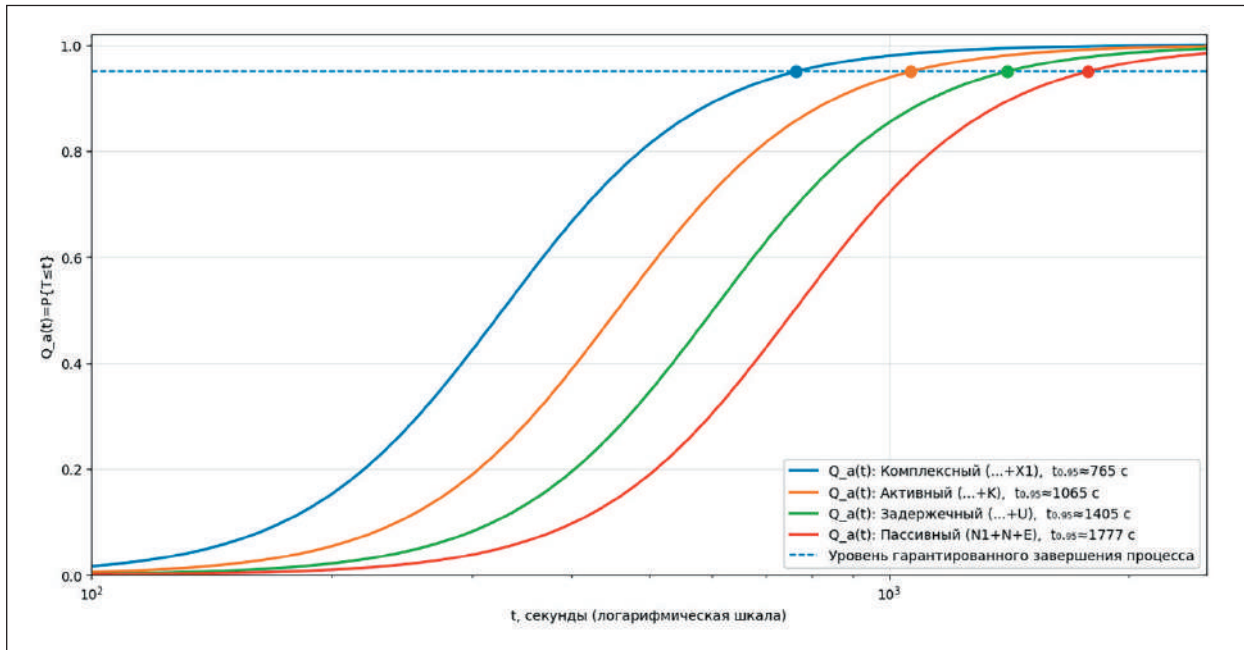


Рис. 7. Предельные функции распределения времени завершения компьютерной разведки

эталонного режима. Поскольку ни один практический сканер не обеспечивает единичную характеристику успеха на всех стадиях, рассчитанный эталон при $P_i = 1$ следует рассматривать как предельный, а нижнюю границу времени для выбранного профиля операций как:

$$Q_a^*(t) = \lim_{P_1 \rightarrow 1, \dots, P_n \rightarrow 1} Q_a(t; P_1, \dots, P_n). \quad (14)$$

Доступность сети как ограничивающий фактор компьютерной разведки и сценарии поведения нарушителя

Доступность к телефонной IP-сети в рамках модели КР должна рассматриваться как входная вероятностная характеристика, определяющая сам факт запуска полного профиля разведывательных операций. Она задается параметром $P_{\text{дост}}$ — вероятностью успешного установления доступа/сеанса на одной попытке и определяется совокупностью факторов физической и логической достижимости: состоянием каналов и маршрутизации, эксплуа-

тационной готовностью сегмента, политиками сегментации и фильтрации (ACL/Firewall), требованиями аутентификации/туннелирования, ограничениями по частоте и объему обращений, а также воздействиями внешних условий (перегрузка, регламентные работы, деградация качества связи).

В модели КР влияние доступности формализуется как дополнительное звено перед основным профилем операций: при $P_{\text{дост}} \ll 1$ возникают вынужденные повторы попыток входа с задержкой, что приводит к сдвигу функции распределения $Q_a(t) = Pr\{T \leq t\}$ вправо и росту среднего времени. На рис. 8 приведены функции при различных значениях вероятностей доступности. С практической точки зрения характер кривых задает поведенческую развилку нарушителя: при высокой доступности он способен опираться на активные стадии и планировать получение результата в ограниченном окне времени; при средней доступности стратегия смещается к работе в расширенном

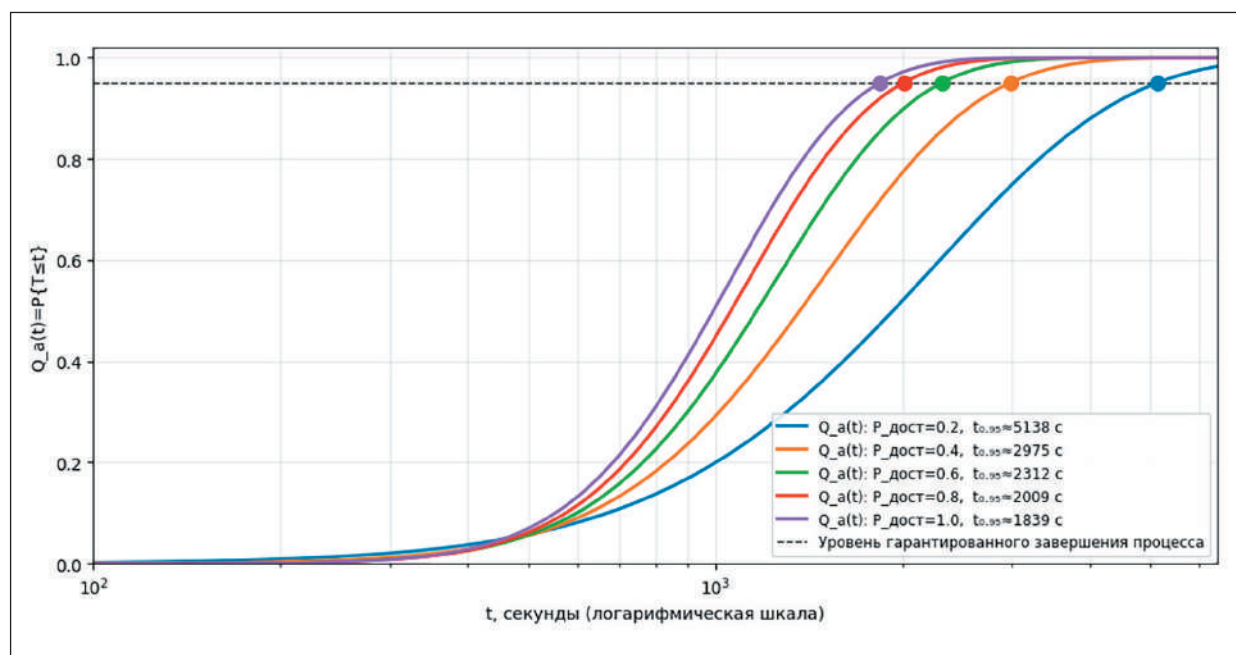


Рис. 8. Влияние вероятности доступности сети на функции распределения времени КР

временном окне с учетом вероятностного ожидания и повторяемости попыток; при низкой доступности становится рациональным минимизировать зависимость от мгновенного доступа, переносить акцент на подготовительные/пассивные стадии и организацию процесса как долговременного, поскольку именно ограничение по $P_{\text{дост}}$ начинает доминировать над временными затратами последующих процедур и фактически определяет достижимые сроки завершения.

Рекомендации по направлениям защиты от компьютерной разведки нарушителя

С учетом полученных зависимостей целесообразно выстраивать защиту как управляемое воздействие на параметры модели КР нарушителя, обеспечивающее сдвиг функции распределения $Q_a(t) = Pr\{T \leq t\}$ вправо, и рост квантиля гарантированного завершения $t_{0,95}$ процесса разведки за счет целенаправленного уменьшения эффективной доступности $P_{\text{дост}}$,

увеличения потерь времени на повторы/ожидание, а также снижения вероятностей успешного прохождения ключевых стадий P_i : корреляция, трассировка, задержанные измерения, пиринговая интеграция посредством сегментации, фильтрации и контроля плоскости управления. Показательные результаты такого воздействия приведены на рис. 9, где видно, что меры селективного доступа дают умеренный прирост $t_{0,95}$, тогда как меры, увеличивающие повторы к подключению, формируют выраженный правый хвост и существенно увеличивают гарантированное время завершения КР.

Кроме того, комбинированный режим дополнительно снижает успешность измерительных стадий, переводя нарушителя из режима короткого активного цикла в режим длительного, многократно повторяемого накопления попыток. Таким образом, практическая стратегия защиты должна сводиться к тому, чтобы для подозрительных источников и неавторизованных контуров:

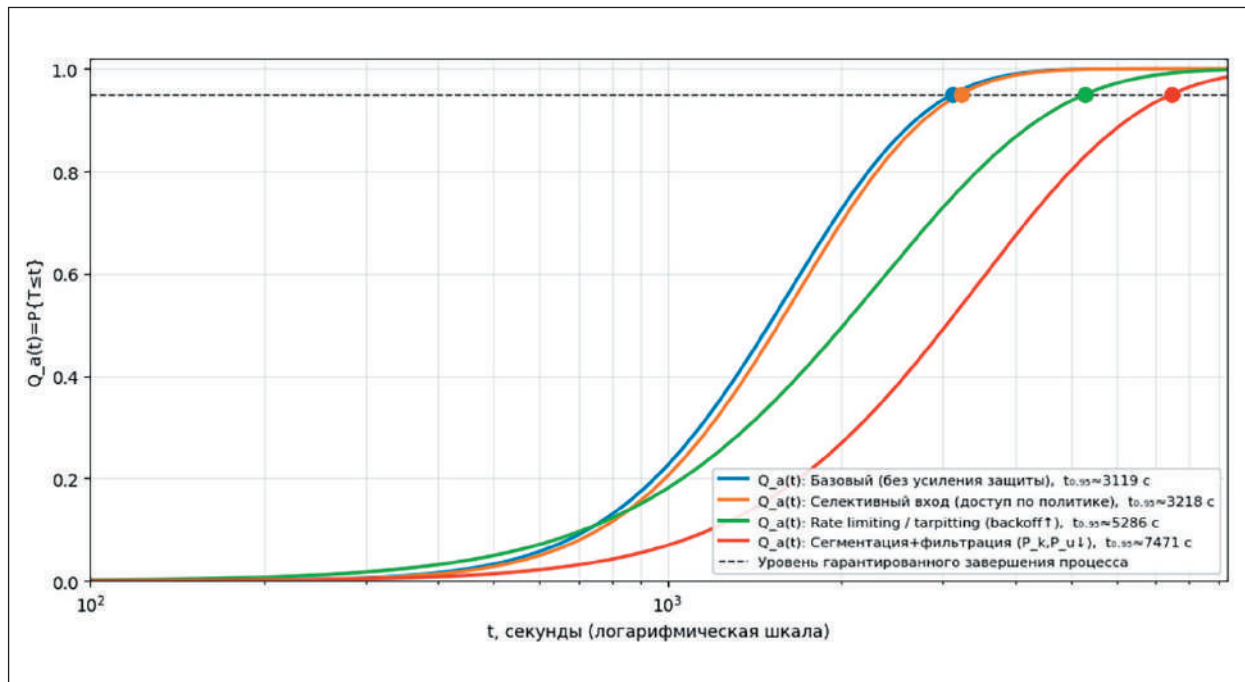


Рис. 9. Сдвиг функций распределения $Q_a(t)$ при применении мер защиты

1. Сделать вход в сеть селективным: обеспечить сохранение доступа для легитимных пользователей и доверенных узлов в штатном режиме, а для неавторизованных источников вероятность успешного установления сессии существенно снизить за счет политики безопасности, вследствие чего для нарушителя вход становится затруднительным.

2. Автоматически вводить и наращивать для подозрительных источников режим деградации доступа: лимитирование числа запросов, ограничения на число соединений, прогрессивные задержки и временные блокировки при многократных попытках, вследствие чего повторные обращения начинают сопровождаться возрастающими временными потерями.

3. Уменьшать результативность активных и задержанных стадий за счет микросегментации, закрытия межсегментных путей, мини-

мизации экспонирования сервисов и защиты плоскости управления.

Заключение

В статье представлена стохастическая модель процесса анализа сетевой активности элементов телефонной IP-сети, выполняемого комплексом компьютерной разведки нарушителя, в которой ключевые процедуры сканирования (обнаружение активных элементов, определение ролей узлов, идентификация типов ОС, перечисление портов/сервисов и последующая корреляция с уязвимостями) описываются дугами с собственными распределениями времени и вероятностями успешного завершения, а повторные запуски при сбоях учитываются петлями возврата.

Для редуцированной структуры с параллельным узлом логического «И» получены явные выражения для функции распределе-

ния и плотности времени завершения, после чего выполнена инкапсуляция параллельного блока с использованием двухмоментной аппроксимации гамма-распределением, позволившая перейти к компактной эквивалентной функции всей подсети и на этой основе вычислять интегральную функцию распределения, математическое ожидание, дисперсию и квантили гарантированного завершения.

Показано, что временные показатели разведывательного цикла имеют выраженную нелинейную зависимость от вероятностей успеха ключевых операций: рост P_i приводит к кратному сокращению среднего времени и характерного срока завершения с эффектом насыщения в области высоких значений, а режимы полного и частичного сканирования формируют ожидаемый компромисс между быстротой и точностью собираемой компьютерной разведкой информации.

Практическая ценность предложенного подхода заключается в том, что модель задает прямую связь между режимами защиты телефонной IP-сети и вероятностно-временными характеристиками разведки нарушителя: через сдвиг $Q_d(t) = Pr\{T \leq t\}$ и рост $t_{0,95}$ можно производить обоснованный выбор мер борьбы, оценивая не только факт противодействия, но и его эффект по времени. При этом следует учитывать допущения базовой постановки. Дальнейшее развитие модели целесообразно направить на учет корреляций по общим ресурсам, нестационарность параметров при активном противодействии и калибровку распределений по данным мониторинга реальной сети, что повысит достоверность прогнозов и прикладную пригодность результатов для задач управления киберустойчивостью VoIP-сетей.

Список источников

1. Evaluating the Functioning Quality of Data Transmission Networks in the Context of Cyberattacks / A. Privalov, [et al.] // *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 16. DOI: 10.3390/en14164755
2. Коцыняк М.А., Кулешов И.А., Лаута О.С. Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2013. 92 с.
3. Шелухин О.И. Причины самоподобия телетрафика и методы оценки показателя Херста // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2007. Т. 3, № 1. С. 5–14.
4. Назаров А.Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. 2-е изд., перераб. Красноярск: Поликом, 2011. 491 с.
5. Привалов А.А., Титов Д.Д. Модель процесса работы узла коммутации технологической IP-сети при обслуживании приоритетного многопродуктового потока в условиях DDoS-атак нарушителя // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: сборник трудов X Международного конкурса научно-исследовательских работ*. Уфа, 2022.
6. Привалов А.А., Титов Д.Д. Модель процесса передачи приоритетного многопродуктового потока по каналу телефонной IP-сети в условиях компьютерных атак // *Инновационные научные исследования в современном мире: сборник трудов X Всерос. конкурса науч.-исслед. работ*. Уфа, 2022.
7. Привалов А.А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем управления движением поездов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб.: ПГУПС. 2017. Т. 14, № 1. С. 137–148.
8. Шибанов А.П. Нахождение плотности распределения времени исполнения GERT-сети на основе эквивалентных упрощающих преобразований // *Автоматика и телемеханика*. 2003. № 2. С. 117–126.

9. Духвалов А.П. Кибератаки на критически важные объекты — вероятная причина катастроф // Вопросы кибербезопасности. 2014. №3 (4). С. 50–53.

10. Scarfone K., Mell P., Brewer T. NIST SP 800-115: Technical Guide to Information Security Testing and Assessment. National Institute of Standards and Technology, 2008.

11. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. Т. 2. Проектирование систем передачи данных / под ред. В.С. Лапина. М.: Мир, 1975. 431 с.

Дата поступления: 30.01.2026

Решение о публикации: 10.04.2026

Контактная информация:

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич —

доктор воен. наук, профессор кафедры «Электрическая связь»;

aprivalov@inbox.ru

ТИТОВ Даниил Дмитриевич — аспирант;

titovdd178@gmail.com

Model for Analyzing Network Activity of Elements in a Telephone IP Network Using an Intruder's Computer Reconnaissance System

A. A. Privalov^{1,3}, D. D. Titov^{1,2}

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

²Supertel OJSC, 38 Petrogradskaya emb., St. Petersburg, 197046, Russia

³National Guard Academy, 1 L. Pilyutova st., St. Petersburg, 198206, Russia

For citation: Privalov A. A., Titov D. D. Model for Analyzing Network Activity of Elements in a Telephone IP Network Using an Intruder's Computer Reconnaissance System // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 516–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-516-530 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop and analyze a stochastic model of the process of analyzing the network activity of elements of a telephone IP network performed by an intruder's computer intelligence (CI) complex to quantify the time characteristics of the intelligence cycle. **Methods:** the network scanner's algorithm is presented as a stochastic network (GERT model), where the stages of detecting active elements, determining the roles of nodes, types of operating systems, ports/services, and analyzing vulnerabilities are described by arcs with their own time distribution functions and success probabilities, and repeated launches are represented by return loops. For the Role, OS, and Ports/Services branches, equivalent Laplace images of the distribution densities are obtained, based on which equivalent functions are derived for the parallel block and the full cycle of the scanner's operation in full and partial scan modes. The integral distribution function, average time, and level of requirements are calculated based on the obtained analytical expressions. **Results:** compact formulas for the equivalent function, distribution function, and average time of VoIP network intelligence are obtained, depending on the probabilities of successful completion of key operations. It is shown that the time characteristics of the process have a pronounced nonlinear dependence on the values of these probabilities: as the probabilities increase, the average time and the time required for successful completion of the scan decrease significantly. A comparison of full and

partial scan modes demonstrates the expected compromise between the completeness of the information obtained by computer intelligence and the speed of obtaining results. **Practical significance:** the model allows for predicting the time characteristics of the CI complex's operation in a VoIP network, identifying “bottlenecks”, and quantifying the impact of network architecture and security measures on the speed at which an intruder can obtain critical information, providing a basis for making informed decisions to enhance cyber resilience.

Keywords: telephone IP network, computer intelligence complex, network scanner; network activity analysis, stochastic network, GERT model, equivalent function, full and partial scanning

References

1. Privalov A., et al. Evaluating the Functioning Quality of Data Transmission Networks in the Context of Cyberattacks, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16. DOI: 10.3390/en14164755
2. Kotsynyak M.A., Kuleshov I.A., Lauta O.S. Ustojchivost' informatsionno-telekommunikatsionnykh setej [Stability of Information and Telecommunication Networks], Saint-Petersburg, *Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta [Polytechnic University Press]*, 2013, 92 p. (In Russian)
3. Shelukhin O.I. Prichiny samopodobiya teletrafika i metody otsenki pokazatelya Khersta [Causes of Self-Similarity in Teletraffic and Methods for Estimating the Hurst Exponent], *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy [Electrical and Information Complexes and Systems]*, 2007, vol. 3, no. 1, pp. 5–14. (In Russian)
4. Nazarov A.N. Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funktsionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setej svyazi sleduyushchego pokoleniya [Models and Methods for Calculating the Quality Indicators of Node Equipment and the Structural and Network Parameters of Next-Generation Communication Networks], 2nd edit., Krasnoyarsk, *Polikom*, 2011, 491 p. (In Russian)
5. Privalov A.A., Titov D.D. Model' protsessy raboty uzla kommutatsii tekhnologicheskoy IP-seti pri obsluzhivanii prioritetnogo mnogoproduktovogo potoka v usloviyakh DDoS-atak narushitelya [Model of the Process of the Technological IP Network Switching Node Operation When Servicing A Priority Multi-Product Flow under DDoS Attacks by the Intruder], *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: sb. trudov Kh Mezhdunarodnogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot [Fundamental and Applied Scientific Research: Proceedings of the 10th International Research Competition]*, Ufa, 2022. (In Russian)
6. Privalov A.A., Titov D.D. Model' protsessy peredachi prioritetnogo mnogoproduktovogo potoka po kanalu telefonnoj IP-seti v usloviyakh komp'yuternykh atak [Model of the Process of Transmitting a Priority Multi-Product Stream over a Telephone IP Network in the Presence of Computer Attacks], *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire: sb. Trud. Kh Vserossiyskogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot [Innovative Scientific Research in the Modern World: Proceedings of the 10th All-Russian Competition of Research Papers]*, Ufa, 2022. (In Russian)
7. Privalov A.A. Metod topologicheskogo preobrazovaniya stokhasticheskikh setej i ego ispol'zovanie dlya analiza sistem upravleniya dvizheniem poezdov [Topological Transformation Method of Stochastic Networks and Its Application to the Analysis of Train Traffic Control Systems], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*, Saint-Petersburg, 2017, vol. 14, no. 1, pp. 137–148. (In Russian)
8. Shibanov A.P. Nakhozhdenie plotnosti raspredeleniya vremeni ispolneniya GERT-seti na osnove ekvivalentnykh uproshchayushchikh preobrazovaniy [Finding the Distribution Density of GERT Network Execution Time Based on Equivalent Simplifying Transformations], *Avtomatika i telemekhanika*

[*Automation and Telemechanics*], 2003, no. 2, pp. 117–126. (In Russian)

9. Dukhvalov A.P. Kiberataki na kriticheski vazhnye ob"ekty — veroyatnaya prichina katastrof [Cyberattacks on Critical Facilities Are a Likely Cause of Disasters], *Voprosy kiberbezopasnosti [Cybersecurity issues]*, 2014, no. 3 (4), pp. 50–53. (In Russian)

10. Scarfone K., Mell P., Brewer T. NIST SP 800-115: Technical Guide to Information Security Testing and Assessment, *National Institute of Standards and Technology*, 2008.

11. Martin Dzh. Sistemnyj analiz peredachi dannykh. T. 2. Proektirovanie sistem peredachi dannykh [System Analysis of Data Transmission. Vol. 2. Design

of Data Transmission Systems], ed. V. S. Lapina, Moscow, *Izdatel'stvo "Mir" [Mir Publishers]*, 1975, 431 p.

Received: January 30, 2026

Accepted: April 10, 2026

Author's information:

Andrey A. PRIVALOV — Dr. Sci. of Military, Professor of the Department "Electrical Communications"; aprivalov@inbox.ru

aprivalov@inbox.ru

Daniil D. TITOV — Postgraduate Student; titovdd178@gmail.com