

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 22, выпуск 3, 2025

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
«Издательский Центр РИОР» по договору
№ ЭА78751 от 28.12.2024

Адрес учредителя и редакции

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

Адрес издателя

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Урал-Пресс» 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

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

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Фото на обложке предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС

Подписано в печать 11.09.2025. **Выход в свет** 25.09.2025.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 34.

Тираж 200 экз. Заказ 3418. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «БУКИ ВЕДИ»,

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2025

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 22, issue 3, 2025

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company

"Publishing Center RIOR" under contract

N ЭА78751 dated December 28, 2024

Founder's and editorial office address

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

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

Publisher's address

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

Mass media registration certificate number

П И Н Ф С 2 - 7 4 9 9 dd. 06.04.2005

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

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

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Ural-Press" 33315

JOURNAL STAFF

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

В. Н. Кавказский

Научно-экспериментальное обоснование основ проектирования и сооружения
интермодального комплекса, интегрированного в международный аэропорт Пулково..... 573

П. К. Рыбин, М. В. Четчуев, А. Н. Иванков, А. Д. Винник

Новые принципы компоновки железнодорожной инфраструктуры,
обслуживающей морские порты 584

Д. Н. Курилкин, А. В. Исаев, В. Ф. Танаев, В. Г. Погудин, А. А. Романова

К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда
при выполнении тяговых и тормозных расчетов..... 594

А. П. Ледяев, А. А. Сокольников, А. Н. Коньков

Математическое моделирование блочной обделки тоннеля большого диаметра 605

С. С. Смирнов

Применение рядов Фурье для прогнозирования объемов перевозок пассажиров
в пригородном сообщении 616

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

Математическое моделирование внешних сил в режимах тяги и торможения,
действующих на тяговый агрегат..... 625

В. А. Бараусов, В. П. Бубнов, В. И. Моисеев

Анализ эффективности применения инновационного специального контактного
провода с антиобледенительным покрытием 631

В. А. Чернов, Д. В. Даниленко, Л. В. Цыганская, С. О. Комиченко, В. П. Ефимов

Ускоренный метод испытания боковых рам инновационной тележки модели 18-9891 643

Л. В. Мартыненко, А. П. Карбушева, Д. П. Кононов

Оценка прочности котла вагона-цистерны при смещении наливного груза 657

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

Векторное управление асинхронным двигателем
с оптронным датчиком — формирователем алгоритма 667

В. А. Анисимов, С. В. Шкурников, А. П. Конюхов

Интеграция инфраструктуры международных транспортных коридоров «Север — Юг»
и Северный морской путь 676

О. Н. Числов, Н. М. Луганченко, Д. С. Безусов

Актуальные направления развития принципов управления
транспортной работой припортовых грузовых станций 685

В. В. Панин, С. С. Греков, Г. Г. Горбунов, Е. В. Панин, Г. В. Лысов, А. Ф. Бородин

Согласованное развитие железнодорожных инфраструктур необщего
и общего пользования: технология, экономика, цифровые инструменты 698

Д. П. Лобеев

Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта 712

В. Н. Смирнов, А. В. Ланг

Собственные частоты вертикальных колебаний мостовых опор немассивной конструкции 722

А. А. Комайданов, А. Н. Смирнов, М. В. Зверев, Т. М. Чернова

Пассивная безопасность грузовых вагонов как критерий инновационности грузового подвижного состава 729

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

М. Д. Вебер, А. В. Кузнецов

К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 2 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями без припазовки) 739

Д. В. Боль, С. Е. Свинцов, А. П. Ледяев

Интеграция BIM-модели стойки опоры с расчетом по диаграммам предельных состояний 750

Н. А. Волкова

Комплексный подход к снижению аварийности на внутренних водных путях Арктического региона России 761

А. А. Шарафутдинова, М. Я. Брынь, Е. Г. Третьякова, Ж. В. Иванова

Опыт разработки цифровой информационной модели промышленных зданий 776

А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина

Методика оценки устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, функционирующей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов 790

Т. Л. Риполь-Сарагоси, И. С. Дурнев, И. Ю. Новосельский

Исследование влияния температуры и освещенности поверхности солнечных фотоэлементов на их энергоэффективность 802

Д. А. Черепанова, А. П. Лейкин

Повышение достоверности результатов контроля прочности бетона при сжатии 811

Л. А. Лосин, А. А. Калинин

Вопросы текущего состояния и дальнейшего развития средств индивидуальной мобильности 823

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

И. В. Чаплин, А. В. Паторняк, С. В. Ефимов

Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста 831

CONTENTS

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

V. N. Kavkazsky

Scientific and Experimental Foundation for the Design and Construction
of an Intermodal Complex Integrated into Pulkovo International Airport 582

P. K. Rybin, M. V. Chetchuev, A. N. Ivankov, A. D. Vinnik

New Principles for the Layout of Railway Infrastructure Serving Seaports 592

D. N. Kurilkin, A. V. Isaev, V. F. Tanaev, V. G. Pogudin, A. A. Romanova

On the Issue of the Inertia Braking System of a Freight Train
When Performing Traction and Braking Calculations 602

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

A Mathematical Model of a Large-Diameter Tunnel Block Lining 614

S. S. Smirnov

Predicting Suburban Passenger Traffic Flows Using the Fourier Series 623

T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi, I. A. Yaitskov

A Mathematical Model of External Forces Acting on the Train Traction
System in Both Traction and Brake Modes 629

V. A. Barausov, V. P. Bubnov, V. I. Moiseev

Efficient Performance of an Innovative Contact Wire with an Anti-Icing Coating 641

V. A. Chernov, D. V. Danilenko, L. V. Tsyganskaya, S. O. Komichenko, V. P. Efimov

Accelerated Test Method for the Side Frames of the 18-9891 Model Innovative Bogie 655

L. V. Martynenko, A. P. Karbusheva, D. P. Kononov

Assessing the Tank Car Boiler's Strength in the Event of Liquid Cargo Displacement 664

A. N. Marikin, A. M. Evstafyev, V. G. Zhemchugov, A. D. Onofriychuk, O. V. Khvostova

Vector Control of Asynchronous Motors with an Optronics Sensor Algorithm Generator 674

V. A. Anisimov, S. V. Shkurnikov, A. P. Konuhov

Integration of the International Transport Corridor Infrastructures
of the North – South and the Northern Sea Route 682

O. N. Chislov, N. M. Luganchenko, D. S. Bezusov

Actual Directions for the Development of Management Principles
for the Transport Operations at Port Freight Stations 695

V. V. Panin, S. S. Grekov, G. G. Gorbunov, E. V. Panin, G. V. Lysov, A. F. Borodin

Coordinated Development of Non-Public and Public Railway
Infrastructures: Technology, Economics and Digital Tools 708

D. P. Lobeev

Digital Network Modelling for Railway Transport Sector at the Intersection
with Other Digital Networks 720

V. N. Smirnov, A. V. Lang

Vertical Natural Frequency Vibrations of Non-Massive Bridge Supports 727

A. A. Komaidanov, A. N. Smirnov, M. V. Zverev, T. M. Chernova

Passive Safety of Freight Wagons As a Criterion for Innovative Freight Rolling Stock 737

**GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH****M. D. Veber, A. V. Kuznetsov**

On Restoring Cantilever Stone Staircases in the Architecture of St. Petersburg.
Part 2. How to Calculate a Straight Flight Staircase with Plane Treads..... 748

D. V. Bol, S. E. Svintsov, A. P. Ledyaev

Integration of BIM-Based Pier Model with Limit State Diagram Calculations 759

N. A. Volkova

An Integrated Approach to Reducing Accidents on Inland Waterways
in the Arctic Region of Russia 773

A. A. Sharafutdinova, M. Ya. Bryn, E. G. Tretyakova, Zh. V. Ivanova

Experience in Building Information Model (BIM) for Industrial Buildings 788

A. K. Kanaev, E. V. Oparin, E. V. Oparina

Assessing the Stability of an Integrated Timescale Synchronization
and Delivery System Operating Under the Influence of Destabilizing Factors 800

T. L. Ripol-Saragosi, I. S. Durnev, I. Yu. Novoselsky

The Impact of the Surface Temperature and Light Intensity
on the Performance of Photovoltaic Cells 809

D. A. Cherepanova, A. P. Leykin

Improving the Reliability of Test Results for Concrete Compressive Strength 820

L. A. Losin, A. A. Kalinin

Contemporary Status and Future Prospects for Personal Mobility Devices 829

**HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT****I. V. Chaplin, A. V. Patornyak, S. V. Efimov**

Application of a Digital Twin Model in an Operational System
for Monitoring Railway Bridges 837



УДК 551.343.74

Научно-экспериментальное обоснование основ проектирования и сооружения интермодального комплекса, интегрированного в международный аэропорт Пулково

В. Н. Кавказский

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

Для цитирования: *Кавказский В. Н.* Научно-экспериментальное обоснование основ проектирования и сооружения интермодального комплекса, интегрированного в международный аэропорт Пулково // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 573–583. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-573-583

Аннотация

В статье рассматриваются перспективы развития железнодорожной инфраструктуры для улучшения транспортной доступности международного аэропорта Пулково. Анализируется проект создания двухпутной электрифицированной линии Лигово — аэропорт Пулково — Шоссейная, которая позволит интегрировать аэропорт в систему пригородно-городских перевозок Санкт-Петербурга. Особое внимание уделено инженерным решениям, включая тоннельные конструкции и подземный терминал, а также проблемам проектирования интермодальных узлов в условиях действующего аэропорта. **Цель:** Оценка устойчивости временной крепи и прогнозирование осадок перронного покрытия аэропорта при строительстве тоннелей под действующей инфраструктурой с учетом нагрузок от широкофюзеляжных воздушных судов (на примере Airbus A380-800). **Методы исследования:** В ходе исследования применялся комплекс взаимодополняющих методов, позволяющих всесторонне оценить поведение системы «перрон — грунтовый массив — крепь» при различных видах нагрузок: натурные испытания, численное моделирование, физическое моделирование, аналитические методы. **Практическая значимость:** Разработаны основы для проектирования и строительства тоннелей на территории аэропортов. Разработаны конкретные инженерные решения по креплению выработок под перронами с гарантией осадок ≤ 40 мм, обоснована эффективность технологии ADECO-RS для сложных гидрогеологических условий, определены оптимальные параметры временной крепи (96 композитных труб + набрызг-бетон 150 мм).

Ключевые слова: Железнодорожная инфраструктура, интермодальный транспорт, аэропорт Пулково, транспортная доступность, тоннельные решения, тоннелестроение, аэропортовая инфраструктура, геомеханическое моделирование, осадки, ADECO-RS.

Аэропорт Пулково — ключевой транспортный узел Северо-Западного региона, однако его связь с городом ограничена автомобильной магистралью. В статье исследуется проект интеграции аэропорта в железнодорожную сеть Санкт-Петербурга для повышения транспортной мобильности и создания интермодального пере-

садочного узла. Главной проблемой транспортной доступности аэропорта Пулково является его зависимость от единственной автомобильной магистрали — Пулковского шоссе. Это приводит к заторам в часы пик и при повышенном пассажиропотоке — рискам задержек из-за ДТП или ремонтных работ. Ограничение пропускной

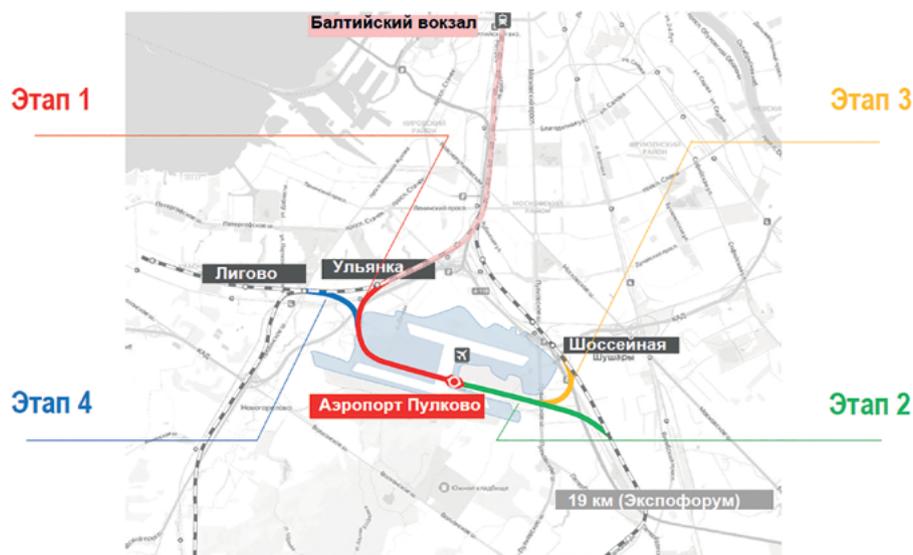


Рис. 1. Схема трассы с указанием этапов сооружения (авторский коллектив под руководством М. А. Бадридзе, 2023; схема предоставлена для использования в данной статье)

способности снижает удобство для пассажиров и логистическую эффективность. Для решения проблемы рассматриваются проекты внеуличного рельсового транспорта, которые обеспечат: высокую скорость сообщения, независимость от дорожной ситуации, интеграцию с городской и пригородной транспортной системой. Наиболее перспективным решением для организации транзитного движения через аэропорт Пулково признано строительство двухпутной электрифицированной линии железнодорожной линии Лигово — Аэропорт Пулково — Шоссейная. Схема трассы с указанием этапов сооружения представлена на рис. 1.

В соответствии с проектным решением протяженность вновь проектируемой линии составила 13,16 км. Для исключения влияния на штатное функционирование аэропорта утвержден и согласован план размещения пассажирского железнодорожного терминала и прилегающих к нему участков в тоннельном варианте, а значительной части соединительной линии — в выемке, с применением подпорных стен. Проект подразумевает сооружение 19 тоннелей и подземного пассажирского терминала на территории аэропорта.

Определен наиболее сложный участок сооружения терминала — проходка тоннелей под перроном аэропорта (рис. 2).

Несмотря на мировой опыт интеграции железнодорожного и авиационного транспорта (Хитроу, Франкфурт-на-Майне, Чанги), российская практика столкнулась с уникальными вызовами: отсутствие нормативной базы для проектирования подземных железнодорожных терминалов в аэропортах, дефицит технологических решений для строительства в условиях действующего аэропорта, неразработанность методик оценки взаимного влияния инфраструктур [1].

Строительство под действующим аэропортом требует принципиально новых решений из-за экстремальных ограничений по допустимым деформациям (максимальные осадки в зоне перрона 40 мм), сложных гидрогеологических условий (водонасыщенные линзы песка), непрерывной эксплуатации аэропорта во время строительства. В связи с перечисленным предложен и обоснован способ проходки тоннелей под перроном аэропорта методом ADECO-RS («Анализ контролируемых деформаций в горных породах и грунтах») [2–5].

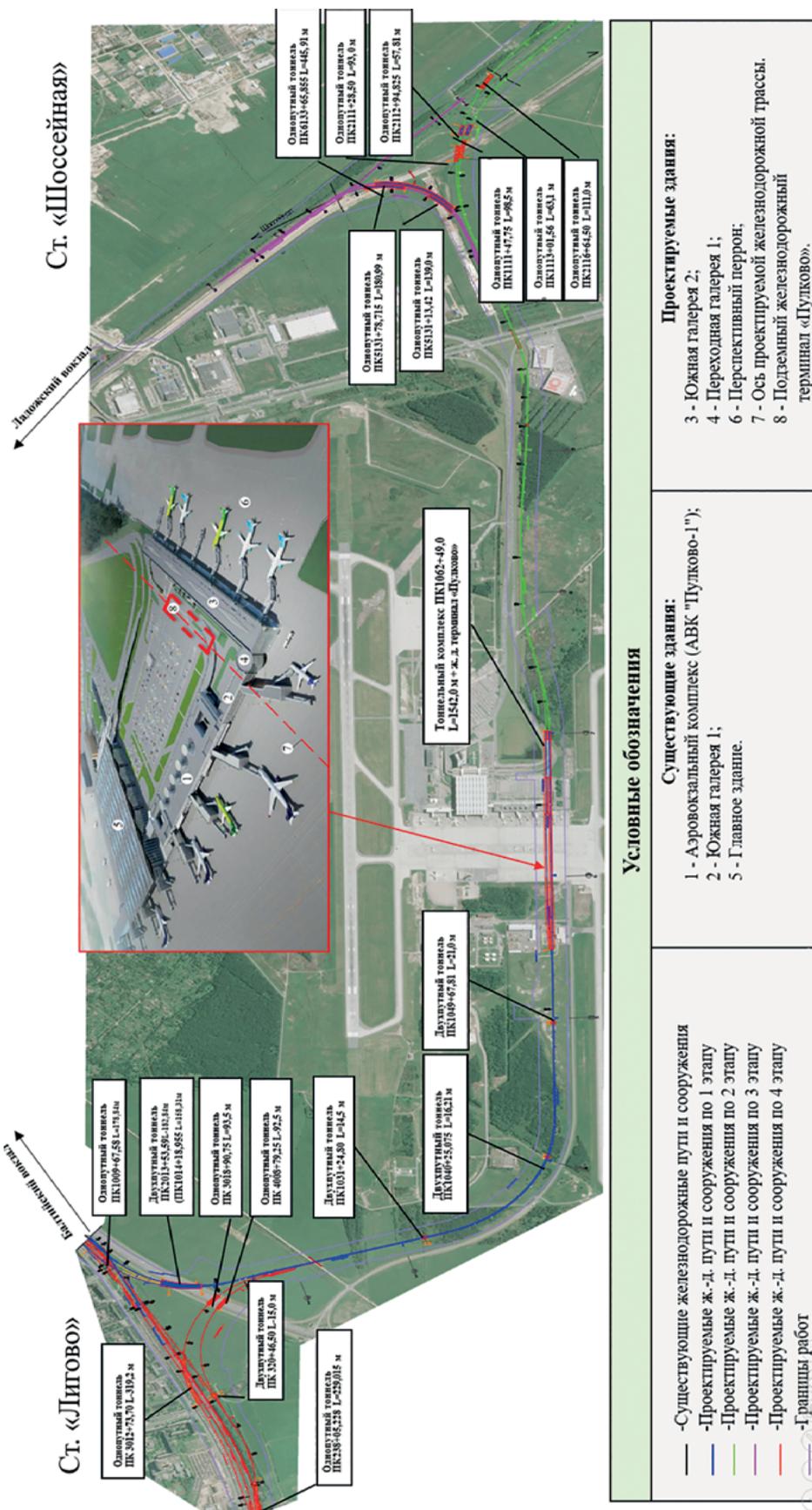


Рис. 2. План трассы железнодорожной линии с местами расположения тоннелей и терминала Пулково (рисунок выполнен автором по материалам проектных решений ОАО «РЖД», АО «ИЭРТ», АО «Ленгипротранс», ПГУПС)

Инженерно-геологическое строение представлено дислоцированными и недислоцированными твердыми глинами кембрийской системы с прослоями песчаников различной мощности.

Применение данного метода требует проведения комплекса исследований, включающих: натурные испытания, исследования на математических моделях и верификацию результатов с данными физического моделирования с учетом воздействия нагрузки от широкофюзеляжного воздушного судна в условиях длительного воздействия. Для этих целей разработана программа теоретических и экспериментальных исследований применения технологии проходки тоннелей горным способом под перроном без снижения пропускной способности аэропорта [6].

В международном аэропорту Домодедово проводились натурные испытания несущих конструкций проходных тоннелей под перроном. Целью испытаний было исследование воздействия воздушных судов на заглубленные тоннели. Особое внимание уделялось анализу нагрузок от самолетов «Аэробус» А300-600 и А380-800 на конструкции тоннелей. Тестирование конструкций производилось на шести секциях, ослабленных технологическими отверстиями. В качестве нагрузки использовались аэродромные плиты ПАГ-18 общей массой 120,6 т. Нагружение осуществлялось поэтапно с шагом 20% от расчетной нагрузки [7, 8].

В результате испытаний обоснован коэффициент динамичности 1,25 и зафиксированы максимальные деформации 1,3 мм (16% от допустимых 8 мм). Установлены факторы влияния на аэродромное покрытие: конфигурация шасси (количество и расположение колес), положение ВС относительно оси тоннеля, тип открытия перрона, продолжительность нагрузки, динамические воздействия при маневрировании.

Эти данные послужили основой для дальнейших исследований и оценки состояния покрытия

аэропорта Пулково. Оценка долговечности аэродромного покрытия аэропорта Пулково осуществлялась с использованием рейтинговой системы ACR/PCR и коэффициента совокупного износа (CDF). Этот подход соответствует международным стандартам (ICAO, FAA) и применяется для управления инфраструктурой аэродромов [9].

Конструкция покрытия состоит из верхнего слоя (цементобетон Вtb4.8, F150, $h = 0,37$ м), нижнего слоя (цементобетон $E_b = 21\,000$ МПа, $h = 0,21$ м). Основание выполнено из двух слоев щебня общей толщиной $h = 1,0$ м.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы: основная нагрузка на перронное покрытие приходится от интенсивно эксплуатируемых узкофюзеляжных воздушных судов (до 210 рейсов/сутки); максимальную нагрузку на покрытие оказывают широкофюзеляжные пассажирские суда «Аэробус А330», «Боинг 777» и грузовой «Боинг 747F»; для обслуживания «Аэробус 380-800» требуются специальные условия и усиленное покрытие в местах стоянки.

Коэффициент совокупного износа CDF аэродромных покрытий аэропорта составил 0,33, что свидетельствует об их хорошем состоянии (рис. 3). Остаточный ресурс составляет около 67% от нормального срока службы. При сохранении текущей нагрузки прогнозируемый срок достижения критического уровня износа ($CDF = 1$) составляет 12–15 лет. Таким образом, техническое состояние перронного покрытия можно считать исправным.

Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния системы «перрон — грунт — крепь — обделка» проведен численным моделированием в COMSOL Multiphysics для оценки влияния модуля деформации грунта ($E = 16, 28, 38$ МПа), расположения воздушного судна (А380-800) относительно оси тоннеля, параметров временной крепи (количество труб, набрызгбетонное покрытие).

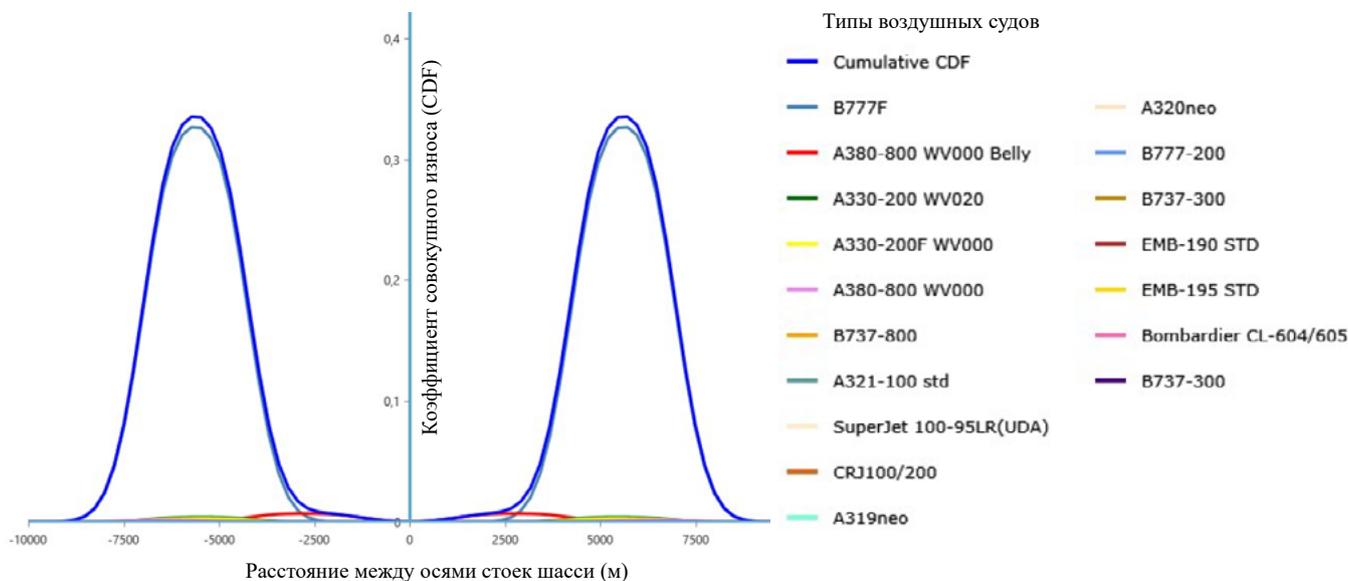


Рис. 3. Зависимости коэффициента совокупного износа CDF аэродромного покрытия для различных типов воздушных судов (график выполнен автором)

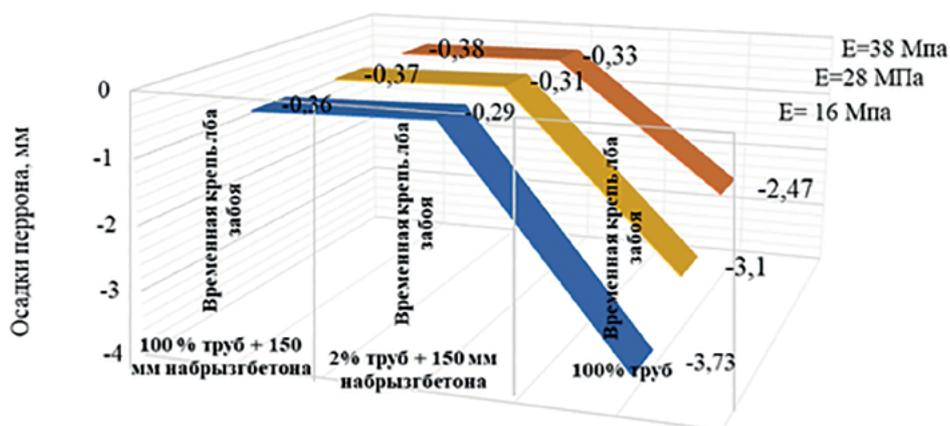


Рис. 4. Зависимости осадок плиты перрона от параметров временной крепи при различных свойствах грунта (график выполнен автором)

Моделирование проходки тоннеля проведено численным моделированием в Midas GTS NX с использованием двух геотехнических моделей поведения грунта: Hardening Soil (учет нелинейного деформирования) и Mohr-Coulomb (идеальная упругопластичность) [10].

В ходе исследований сделаны ключевые выводы. Изменение модуля деформации грунта (16–38 МПа) не влияет на осадки плиты перрона. Наибольшая эффективность крепи достигается при 96 трубах опережающего крепления и набрызгбетонном покрытии (150 мм) (рис. 4).

Влияние положения воздушного судна A380 при разных углах позиционирования (0°, 45°, 90°) по отношению к оси тоннеля не оказывает существенного влияния. Разница в осадках составила ≤ 1 мм, а крепь остается стабильной.

Результаты моделирования проходки позволили установить, что модель Hardening Soil точнее определяет осадки, чем Mohr-Coulomb: 13,23 мм (Hardening Soil) и 2,17 мм (Mohr-Coulomb). Максимальные осадки после проходки составили 23 мм (без нагрузки), 26 мм (с нагрузкой от A380). Проходка второго тоннеля (+16 м

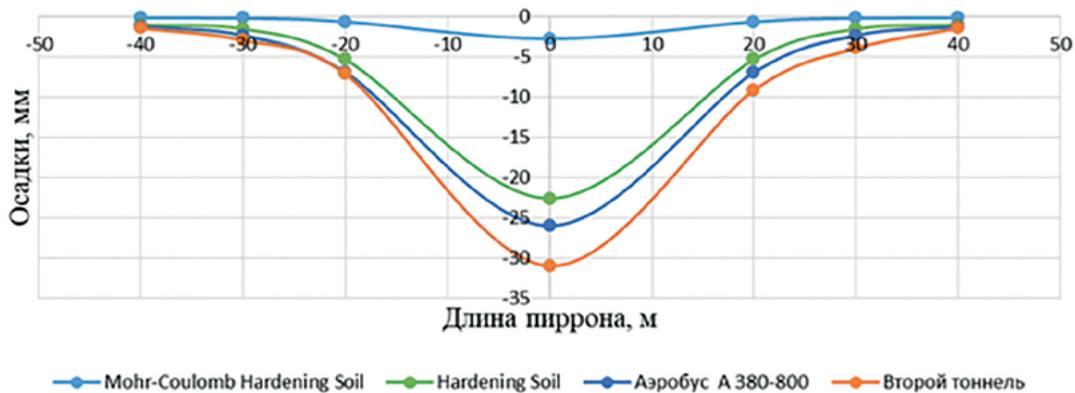


Рис. 5. Осадки перрона, вызванные проходкой, дополнительной нагрузкой от воздушного судна, проходкой второго тоннеля (график выполнен автором)

Таблица 1. Физико-механические характеристики эквивалентных материалов

| № п/п | Наименование материала | Параметр | Натура | Модель | |
|-------|------------------------|------------------------------|--------|-----------|------------|
| | | | | расчетные | полученные |
| 1 | Протерозойские глины | E , МПа | 28 | 1,16 | 1,5 |
| | | C , кПа | 100 | 4,13 | 6 |
| | | φ , град. | 23 | 23 | 23 |
| | | γ , кН/м ³ | 23 | 23 | 19 |
| 2 | Арки временной крепи | E , МПа | 753 | 0,023 | 0,023 |
| 3 | Композитные трубы | E , МПа | 18,88 | 0,025 | 0,025 |

от первого) добавляет 5 мм осадок (рис. 5). Суммарные осадки составили 31 мм, что ниже допустимых (40 мм).

Для верификации данных математических моделей проведены исследования геомеханической системы методом физического моделирования из эквивалентных материалов, целью которых являлся анализ напряженно-деформированного состояния временной крепи и устойчивости забоя выработки под перроном и оценка влияния проходческих работ на величины осадки бетонного покрытия перрона при длительном воздействии широкофюзеляжного воздушного судна «Аэробус А380-800».

Нагрузка в модели с масштабom 1:20 (линейные размеры модели в 20 раз меньше натурy) при весе самолета 592 тс и коэффициенте динамичности $K_d = 1,25$, определенная по формуле:

$$F_{\text{модели}} = F_{\text{натурy}} \left(\frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натурy}}} \right)^2, \quad (1)$$

где $\frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натурy}}} = \frac{1}{20}$ — линейный масштаб, составила 18,14 кН.

Для эквивалентных материалов приняты следующие условия подобия:

– для модуля деформации

$$E_{\text{модели}} = \frac{\gamma_{\text{модели}}}{\gamma_{\text{натурy}}} \cdot \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натурy}}} E_{\text{натурy}}; \quad (2)$$

где γ — удельный вес;

– для сцепления материала, моделирующего грунт:

$$C_{\text{модели}} = \frac{\gamma_{\text{модели}}}{\gamma_{\text{натуры}}} \cdot \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}} C_{\text{натуры}}; \quad (3)$$

– для угла внутреннего трения φ :

$$\varphi_{\text{модели}} = \varphi_{\text{натуры}}; \quad (4)$$

– для удельного веса γ :

$$\gamma_{\text{модели}} = \gamma_{\text{натуры}}$$

$$\frac{\gamma_{\text{модели}}}{\gamma_{\text{натуры}}} = \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}} = 20 \frac{\text{модели}}{\text{натуры}} = \frac{l_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}} = 20. \quad (5)$$

Физико-механические характеристики материалов, эквивалентных моделируемым грунтам и элементам конструкции, приведены в табл. 1.

Для моделирования длительного воздействия в эксперименте с использованием теории подобия определен временной масштаб. Поскольку при определении осадок доминируют гравитационные силы, используется число Фруда Fr , вычисляемое по формуле:

$$Fr = \frac{v^2}{g L}, \quad (6)$$

где v — скорость;

g — ускорение свободного падения;

L — характерный размер.

В качестве условия подобия принято:

$$Fr_{\text{модели}} = Fr_{\text{натуры}}. \quad (7)$$

Для масштабирования времени с использованием числа Фруда определяется временной масштаб ($t_{\text{модели}} = t_{\text{натуры}}$);

$$\frac{t_{\text{модели}}}{t_{\text{натуры}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{модели}}}{L_{\text{натуры}}}}. \quad (8)$$

При масштабе длины 1:20 он составляет:

$$\frac{t_{\text{модели}}}{t_{\text{натуры}}} = \sqrt{\frac{1}{20}} \approx \frac{1}{4,47}. \quad (9)$$



a



б

Рис. 6. Общий вид стенда:

a — максимальная нагрузка 3,6 т (35,3 кН);

б — состояние выработки при максимальной нагрузке (фото выполнено автором)

Таким образом, 1 сутки при моделировании эквивалентен $\approx 4,47$ суток в натуре.

Общий вид стенда, использованного при моделировании, приведен на рис. 6.

В рамках каждого этапа проводился мониторинг параметров напряженно-деформированного состояния контура выработки и лба забоя с использованием тензометрических датчиков и геодезических систем.

Эксперимент длился 20 циклов в течение 140 суток (7 дней/цикл) в соответствии с масштабом модели, что соответствует 625 суткам (1,7 года) в натуре при коэффициенте масштабирования времени 4,47.

Величины осадок дневной поверхности при длительном воздействии широкофюзеляжного воздушного судна «Аэробус А380-800», определенные по осадкам арок.

Прогнозируемые осадки (среднее значение — 553 мм) накапливаются за 1,7 года под воздействием нагрузки, эквивалентной удвоенной массе самолета (1480 т).

Данный сценарий является маловероятным в реальных условиях и был реализован исключительно в лабораторных условиях для оценки

эффективности работы временной крепи при экстремальных нагрузках.

Для оценки критического времени, при котором будут превышены нормативные значения, равные 40 мм, рассмотрена нагрузка от веса воздушного судна «Аэробус А380-800». При груз в модели достиг значений, равных весу воздушного судна, через 10 циклов (10,4 месяца в натуре), при этом осадки в среднем составили 253 мм. Динамика осадок при длительном воздействии воздушного судна «Аэробус А380-800» представлена на рис. 7.

На основе представленных данных эксперимента можно сделать следующие **выводы**:

Разработанная математическая модель взаимодействия элементов системы «перрон — грунтовый массив — временная крепь» при действии нагрузок от веса воздушного судна может быть использована для прогноза значений осадок поверхности аэродромного покрытия.

Предложенные технология проходки тоннеля и конструкция временной крепи демонстрируют свою применимость в условиях наличия нагрузок, обусловленных весом тяжелых воздушных судов типа «Аэробус А380-800».

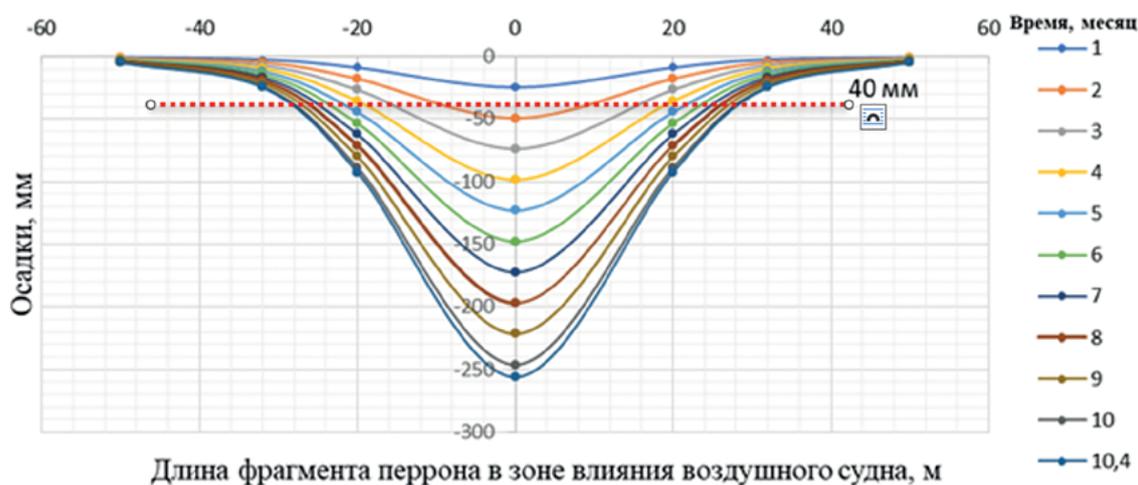


Рис. 7. Зависимости осадок перрона от времени воздействия (10,4 месяца) при действии веса воздушного судна «Аэробус А380-800» (график выполнен автором)

Кратковременное нахождение воздушного судна над выработкой, например, при рулении или стоянке, не приводит к критическим деформациям. Превышение нормативных осадок (40 мм) происходит только при достаточно продолжительном воздействии (более 1,5 месяца).

Полученные результаты позволяют выполнить долгосрочный прогноз деформаций грунтового массива. Накопленные за 10,4 месяца осадки, составляющие 254 мм, указывают на необходимость обязательного учета временного фактора при проектировании; регулярного мониторинга деформаций в зонах с постоянной нагрузкой; применения компенсирующих мер (усиление крепи и ограничение времени стоянки судов).

Полученные данные подтверждают эффективность предложенной технологии крепления выработки даже при учете динамичности и цикличности нагрузок.

Список источников

1. Кавказский В. Н. Анализ мировых тенденций развития интермодальных пересадочных узлов на базе международных аэропортов / В. Н. Кавказский // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 21. — Вып. 1. — С. 22–31. DOI: 0.20295/1815-588X-2024-01-22-31.
2. Коньков А. Н. Оценка влияния опережающей крепи кровли и лба забоя на устойчивость выработки при проходке автодорожного тоннеля в городе Сочи / А. Н. Коньков, Т. В. Иванес, В. И. Хомутов, В. Н. Кавказский // Промышленное и гражданское строительство. — 2012. — № 6. — С. 23–25.
3. Lunardi P. Design and Construction of Tunnels: ADECOR-S Approach / P. Lunardi. — 2008.
4. Меркин В. Е. О комбинированных обделках транспортных тоннелей из набрызг-бетона с напыляемой гидроизоляцией (по материалам семинара в Норвегии) / В. Е. Меркин // Метро и тоннели. — 2011. — № 3. — С. 16–17.
5. Чеканов П. В. Тоннельный переход между Северным и Южным терминальными комплексами в аэропорту Шереметьево / П. В. Чеканов // Подземные горизонты. — 2016. — № 11. — С. 68–73.
6. Ledyayev A. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo” / A. Ledyayev, E. Davidenko, V. Kavkazskiy // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. — 2021. — Pp. 28–36.
7. Афонин Д. А. Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей / Д. А. Афонин, В. Н. Кавказский, А. А. Никитчин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 432–443.
8. Меркин В. Е. Управление геотехническими рисками в подземном строительстве / В. Е. Меркин, М. Г. Зерцалов, Д. С. Конюхов // Метро и тоннели. — 2013. — № 6. — С. 36–39.
9. ICAO. Aerodrome Design Manual. — 2018.
10. Баклашов И. В. Геомеханика: в 2 т. / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия, А. Н. Шашенко, В. Н. Борисов. — М.: Горная книга, 2004. — Т. 1: Основы геомеханики. — Т. 2: Геомеханические процессы.

Дата поступления: 30.06.2025

Решение о публикации: 10.07.2025

Контактная информация:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич —
канд. техн. наук, доц.; kavkazskiy_vn@mail.ru

Scientific and Experimental Foundation for the Design and Construction of an Intermodal Complex Integrated into Pulkovo International Airport

V. N. Kavkazsky

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

For citation: Kavkazskiy V. N. Scientific and Experimental Foundation for the Design and Construction of an Intermodal Complex Integrated into “Pulkovo” International Airport // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 573–583. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-573-583

Summary

The paper examines the prospects for developing railway infrastructure to improve the accessibility of transport to and from Pulkovo International Airport. The creation of an electrified double-track Ligovo — Pulkovo Airport — Highway line is being discussed as a project. The integration of the airport into St. Petersburg’s suburban and urban transportation system is planned. Special attention is paid to engineering solutions, such as tunnel structures, an underground terminal, and intermodal nodes within an operating airport. **Purpose:** To assess the stability of the temporary support and to forecast the setting of the airport apron surface during the construction of tunnels under the existing infrastructure, taking into account the loads from wide-body aircraft such as Airbus A380-800). **Methods:** A set of complementary methods was used to comprehensively assess the behavior of the “apron — soil mass — support” system under various loads, including field tests, numerical modelling, physical modelling, and analytical methods. **Practical significance:** The foundations for the design and construction of tunnels on the airport territory have been developed. Specific engineering solutions have been found for fixing workings under the aprons with their setting of not more than 40 mm. The ADECO-RS technology for difficult hydrogeological conditions has been proven effective, and the temporary support optimal parameters have been determined (96 composite pipes + 150 mm spray concrete).

Keywords: Railway infrastructure, intermodal transport, Pulkovo airport, transport accessibility, tunnel solutions, tunnelling, airport infrastructure, geomechanical modelling, setting, ADECO-RS.

References

1. Kavkazskiy V. N. Analiz mirovykh tendentsiy razvitiya intermodal’nykh peresadochnykh uzlov na baze mezhdunarodnykh aeroportov [Analysis of global trends in the development of intermodal transfer hubs based on international airports]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2025, vol. 21, Iss. 1, pp. 22–31. DOI: 0.20295/1815-588X-2024-01-22-31. (In Russian)
2. Kon’kov A. N., Ivanov T. V., Khomutov V. I., Kavkazskiy V. N. Otsenka vliyaniya operezhayushchey krepki krovli i lba zaboya na ustoychivost’ vyrabotki pri prokhodke avtodorozhnogo tonnelya v gorode Sochi [Assessment of the influence of the leading roof and face lining on the stability of the workings during the excavation of a road tunnel in the city of Sochi]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel’stvo* [Industrial and civil engineering]. 2012, Iss. 6, pp. 23–25. (In Russian)
3. Lunardi P. Design and Construction of Tunnels: ADECOR-S Approach, 2008.
4. Merkin V. E. O kombinirovannykh obdelkakh transportnykh tonneley iz nabryzg-betona s napylyaemoy gidroizolyatsiyey (po materialam seminar v Norvegii) [On combined linings of transport tunnels from shotcrete with sprayed waterproofing (based on the materials of the seminar in Norway)]. *Metro i tonneli* [Metro and tunnels]. 2011, Iss. 3, pp. 16–17. (In Russian)

5. Chekanov P. V. Tunnel'nyy perekhod mezhdu Severnym i Yuzhnym terminal'nymi kompleksami v aeroportu Sheremet'evo [Tunnel crossing between the Northern and Southern terminal complexes at Sheremetyevo Airport]. *Podzemnye gorizonty* [Underground horizons]. 2016, Iss. 11, pp. 68–73. (In Russian)
6. Ledyayev A., Davidenko E., Kavkazskiy V. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo”. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia, 2021, pp. 28–36.
7. Afonin D. A., Kavkazskiy V. N., Nikitchin A. A. Operativnyy geodezicheskiy kontrol' deformatsiy prizaboynoy zony pri innovatsionnykh tekhnologiyakh prokhodki tunney [Operational geodetic control of deformations of the bottomhole zone during innovative tunnel boring technologies]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 432–443. (In Russian)
8. Merkin V. E., Zertsalov M. G., Konyukhov D. S. Upravlenie geotekhnicheskimi riskami v podzemnom stroitel'stve [Geotechnical risk management in underground construction]. *Metro i tonneli* [Metro and tunnels]. 2013, Iss. 6, pp. 36–39. (In Russian)
9. ICAO. Aerodrome Design Manual, 2018.
10. Baklashov I. V., Kartoziya B. A., Shashenko A. N., Borisov V. N. *Geomekhanika: v 2 t. T. 1: Osnovy geomekhaniki. T. 2: Geomekhanicheskie protsessy* [Geomechanics: in 2 volumes. Volume 1: Fundamentals of Geomechanics. Volume 2: Geomechanical Processes]. Moscow: Gornaya kniga Publ., 2004. (In Russian)

Received: June 30, 2025

Accepted: July 10, 2025

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZSKY — PhD in Engineering,
Associate Professor; Kavkazskiy_vn@mail.ru

УДК 656.21

Новые принципы компоновки железнодорожной инфраструктуры, обслуживающей морские порты

П. К. Рыбин¹, М. В. Четчуев¹, А. Н. Иванков², А. Д. Винник¹

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

²ООО «ПСК ТехПроект», Российская Федерация, 107140, Москва, 3-й Красносельский пер., 21, стр. 1, оф. 305

Для цитирования: Рыбин П. К., Четчуев М. В., Иванков А. Н., Винник А. Д. Новые принципы компоновки железнодорожной инфраструктуры, обслуживающей морские порты // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 584–593. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-584-593

Аннотация

Цель: Содержащиеся в технической и учебной литературе схемные решения и принципы компоновки обслуживающей порты железнодорожной инфраструктуры длительное время не пересматривались. К настоящему времени произошли существенные изменения как в части организации работы непосредственно железнодорожного транспорта, так и в части его взаимодействия с водным. Также следует учесть и произошедший внушительный рост объемов перевалки в ряде морских портов. Эти обстоятельства требуют пересмотра и актуализации существующих принципов формирования конфигурации обслуживающей порты железнодорожной инфраструктуры. **Методы:** Исследования проводились с использованием ретроспективного и системного анализа схем и принципов компоновки обслуживающей порты железнодорожной инфраструктуры, а также технологии работы портовых узлов. **Результаты:** Было установлено, что существующие типовые схемные решения не обеспечивают грузооборот, характерный для ряда морских портов России. Сделан вывод, что разработка новых схем компоновки железнодорожной инфраструктуры при больших объемах грузооборота порта должна осуществляться с учетом обеспечения поточности поездных и маневровых передвижений. Определено, что современные принципы организации работы стыковых пунктов предполагают обустройство «сухих портов», наличие которых не предусматривается имеющимися типовыми схемными решениями. **Практическая значимость:** Предложены новые схемы компоновки обслуживающей порт железнодорожной инфраструктуры, которые могут быть использованы в последующем в качестве типовых решений.

Ключевые слова: Железнодорожная станция, морской порт, терминал, объем перевалки, схемные решения, организация движения.

Организация эффективного взаимодействия и обеспечение потребных объемов перевалки грузов между железнодорожным и водным транспортом является сложной и многофакторной задачей. Результаты транспортного взаимодействия будут зависеть от величины колебания объемов перевозок, соответствия пропускной и перерабатывающей способности транспортно-логистиче-

ской инфраструктуры предъявляемым объемам перевозок, уровня маршрутизации вагонопотоков, степени укомплектованности персоналом и техническими средствами, оптимальности применяемых технологических процессов и многих других факторов [1–4]. Особое внимание в части обеспечения эффективности смешанных железнодорожно-водных перевозок следует уделить

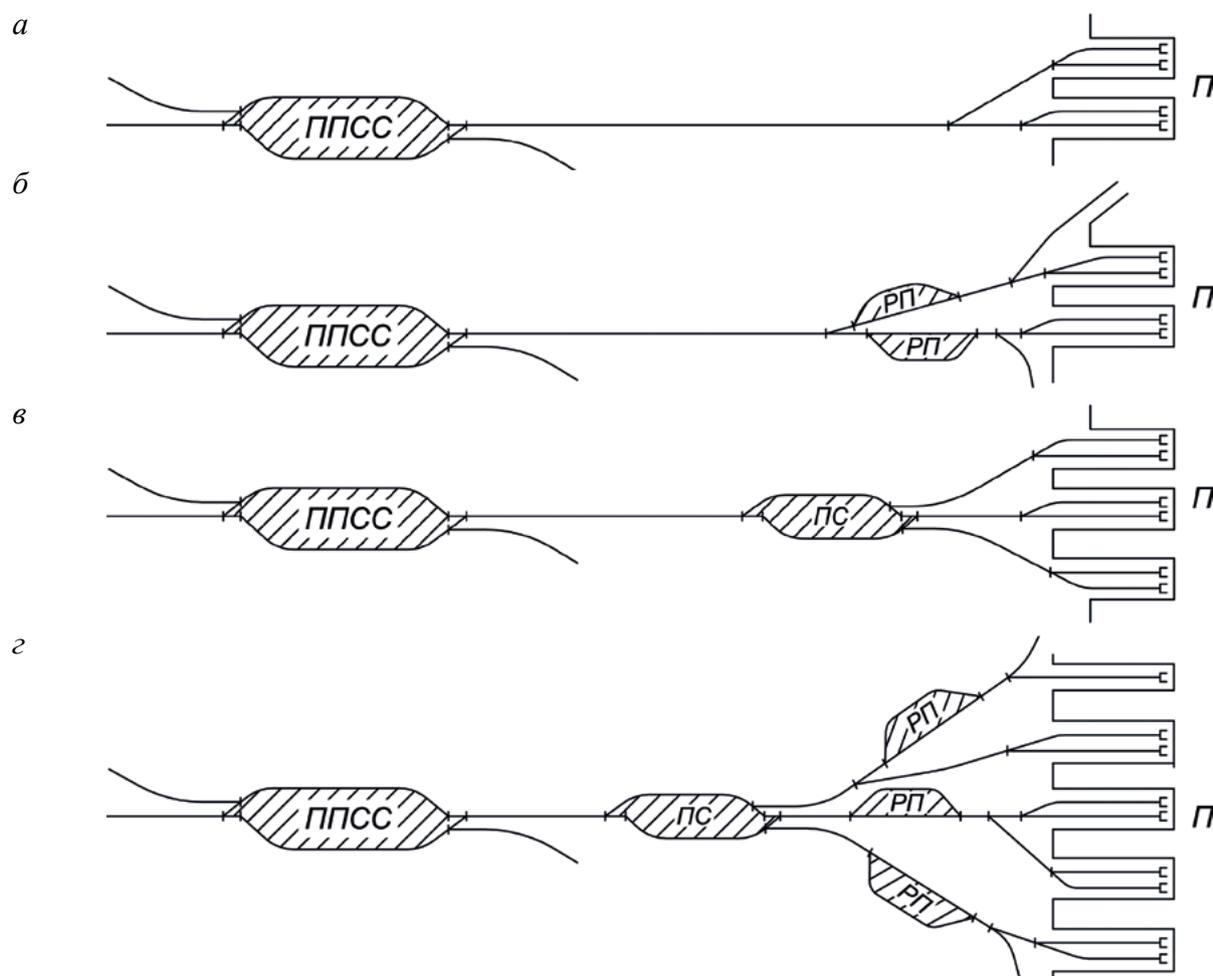


Рис. 1. Схемы вариантов железнодорожного обслуживания портов:

ППСС — предпортовая сортировочная станция; *ПС* — портовая станция; *РП* — районный парк; *П* — порт

рациональности схем взаимного расположения элементов обслуживающей порт железнодорожной инфраструктуры.

Анализ ранее действовавших нормативных документов [5, 6] и учебной литературы [7, 8] показал, что в настоящее время существует четыре принципиальные схемы конфигурации обслуживающей порт железнодорожной инфраструктуры (рис. 1).

Схема, представленная на рис. 1, *а*, предусматривает обслуживание порта непосредственно с находящейся на удалении предпортовой сортировочной станции. Она рекомендуется к применению при небольшом грузообороте порта и числе причалов менее четырех. Если причалов в порту

четыре и более, то в зависимости от удаленности сортировочной станции от порта, а также расчетных объемов перевалки между железнодорожным и водным транспортом принимается одна из трех оставшихся схем.

Схема, предусматривающая обслуживание порта через районные парки (см. рис. 1, *б*), считается целесообразной в следующих случаях:

- объем перевалки груза до 10 млн т в год при расстоянии между ППСС и портом до 7–8 км;
- объем перевалки груза до 5 млн т в год при расстоянии между ППСС и портом до 12–13 км.

Если объем перевалки в порту составляет 15 млн т в год и более и расстояние от ППСС не превышает 13 км, к использованию рекоменду-

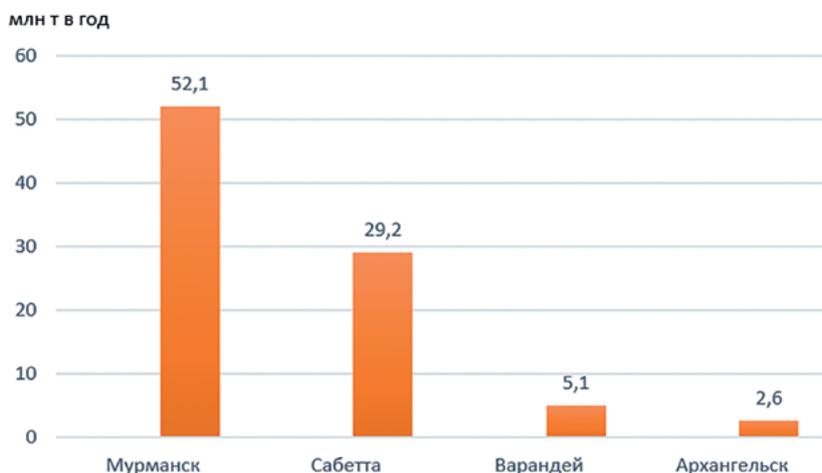


Рис. 2. Грузооборот некоторых портов Арктического бассейна за 2024 г.

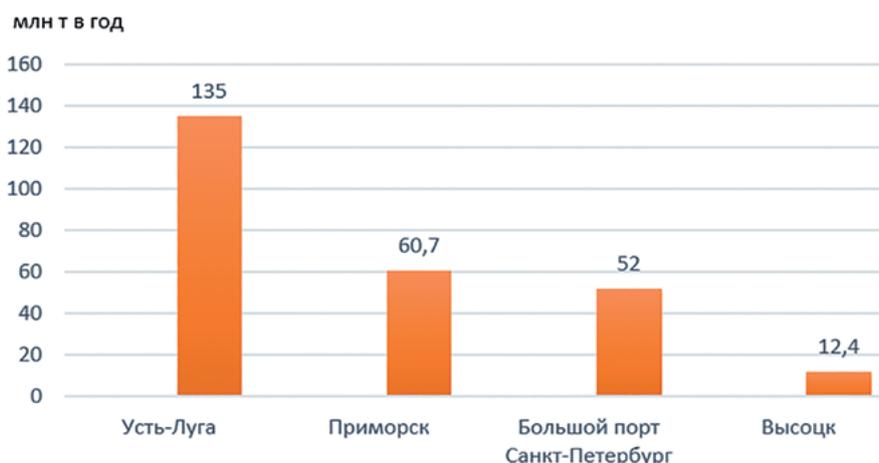


Рис. 3. Грузооборот некоторых портов Балтийского бассейна за 2024 г.

ется схема с работой через портовую станцию (см. рис. 1, в).

Последняя схема (см. рис. 1, г) считается рациональной при большом удалении ППСС от крупного порта, при этом расчетный объем перевалки груза не уточняется.

Из приведенных выше данных можно заключить, что в целом решения по схемам железнодорожного обслуживания портов разработаны на объемы перевалки в порту 15 млн т в год и более, при этом предельно возможные их значения ни нормами проектирования, ни учебной литературой не определены. Анализ реальных данных по грузообороту морских портов России за 2024 год показывает, что существенное их число пре-

вышает объем перевалки в 15 млн т в год, при этом имеются порты (Усть-Луга, Новороссийск и др.), объем работы которых превышает указанное значение в 9–10 раз. На рис. 2–5 приведены диаграммы с объемами грузооборота некоторых портов Арктического, Балтийского, Азово-Черноморского и Дальневосточного бассейнов, составленные в соответствии с данными информационного портала «Морские вести России» [9].

Следует учесть и то обстоятельство, что в настоящее время фактическая технология взаимодействия предпортовой сортировочной станции, портовой станции и районных парков существенно отличается от описанной в технической и учебной литературе.

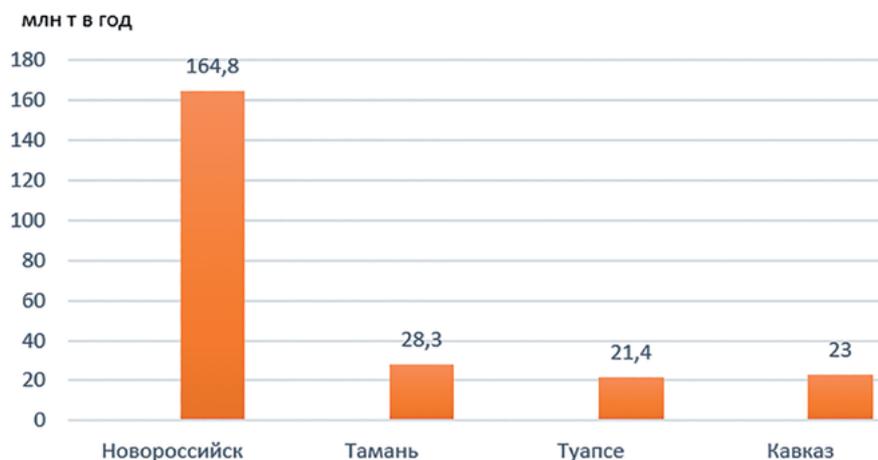


Рис. 4. Грузооборот некоторых портов Азово-Черноморского бассейна за 2024 г.



Рис. 5. Грузооборот некоторых портов Дальневосточного бассейна за 2024 г.

Ранее предполагалось, что поступающий в порт вагонопоток преимущественно немаршрутизирован. Исходя из этого, направление сортировки вагонов выбиралось с подхода с внешней сети в сторону порта. Портовые станции предполагали подбор вагонов по районным паркам. В свою очередь, районные парки занимались подбором вагонов по прикордонным путям причалов. Порожний вагонопоток после выгрузки направлялся в регулировку без дополнительного подбора и переработки.

В современных условиях — в условиях работы частного парка, роста маршрутизации и модернизации портовой инфраструктуры ситуация выглядит следующим образом. Процент марш-

рутизации вагонопотока, поступающего в грузеном состоянии в порт, достигает 80% (например, станция Лужская). Длина фронтов выгрузки зачастую обеспечивает размещение на них всего состава либократно его $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{3}$, в зависимости от местных условий и конфигурации путевого развития терминала. Таким образом, районные парки сосредоточены в основном на выполнении приемосдаточных операций, технического обслуживания и коммерческого осмотра с прибывающими и отправляемыми поездами.

Маршрутизированный вагонопоток поступает в районные парки поездным порядком с внешней сети, минуя сортировочную станцию. Порожний вагонопоток после выгрузки, как правило,

требует детального подбора по собственникам, а также по категории годности под погрузку. Ввиду лимитированной емкости путевого развития районных парков данные операции по подбору вагонов целесообразно сконцентрировать на предпортовой сортировочной станции.

О целесообразности выноса операций по подбору вагонов из районных парков также свидетельствует то обстоятельство, что вагоны одного типа и одного оператора могут высвобождать из-под груза на разных терминалах порта. В этом случае точкой сборки должен являться сортировочный комплект (сортировочная система), что позволит исключить дублирование одноименных назначений в разных районах порта.

Еще одной важной характерной особенностью существующей структуры грузо- и вагонопотоков портов является почти полное отсутствие двояких грузовых операций. Отдельные попытки использования полувагонов для погрузки контейнеров (для исключения подпитки порожними фитинговыми платформами) не сильно изменяют коэффициент двояких операций и пробег порожнего подвижного состава.

Все изложенные выше условия требуют высокой пропускной и провозной способности соединительных линий между предпортовой сортировочной станцией и районными парками. Приведенные на рис. 1 типовые схемы железнодорожного обслуживания портов с однопутными соединительными линиями между ППСС и РП этому условию не удовлетворяют. Укладка вторых путей не решает вопроса дефицита пропускной способности, так как появятся конфликтные точки (точки пересечения маршрутов) в горловине парка примыкания второго пути на ППСС.

С учетом обозначенной проблемы, а также исходя из того, что типовыми решениями современные порты (в зависимости от местных условий) обустраивают либо перпендикулярно, либо параллельно береговой линии, предлагаются две

схемы компоновки железнодорожной инфраструктуры порта (рис. 6), обеспечивающие высокую пропускную и провозную способность.

Приведенные на рис. 6 схемы разработаны с учетом организации кольцевого движения поездов и внутриузловых передач, что позволяет обеспечить поточность передвижений и минимизацию враждебности маршрутов. Каждая схема предусматривает наличие двух технологических линий: для переработки немаршрутизированного вагонопотока и для сквозного пропуска маршрутов в порт. Обратное преобладает немаршрутизированный вагонопоток, так как необходимо подбирать вагоны по собственникам, категориям годности с учетом их заадресовки под погрузку и необходимости выполнения ремонтов. Представленными схемными решениями немаршрутизированный вагонопоток из терминалов порта возвращается в парк приема предпортовой сортировочной станции.

Перпендикулярное расположение сортировочного комплекта к береговой линии (см. рис. 6, а) обустраивается при достаточной по длине станционной площадке. Расположение основных парков сортировочной станции предусмотрено таким, чтобы обеспечить подбор и сортировку вагонов на выход из порта в соответствии с преобладающим направлением немаршрутизированного вагонопотока. В отдельных случаях при большой дробности сортировки входящего потока в данной схеме может быть предусмотрена вторая сортировочная система, обеспечивающая подбор вагонов по терминалам порта. Маршрутизированный и немаршрутизированный вагонопоток в предлагаемой схеме поступает на терминалы порта против часовой стрелки. В таком же направлении производится и возвращение вагонов из терминалов на сортировочную станцию.

Параллельное расположение сортировочного комплекта по отношению к береговой линии (см. рис. 6, б) отличается в технологии органи-

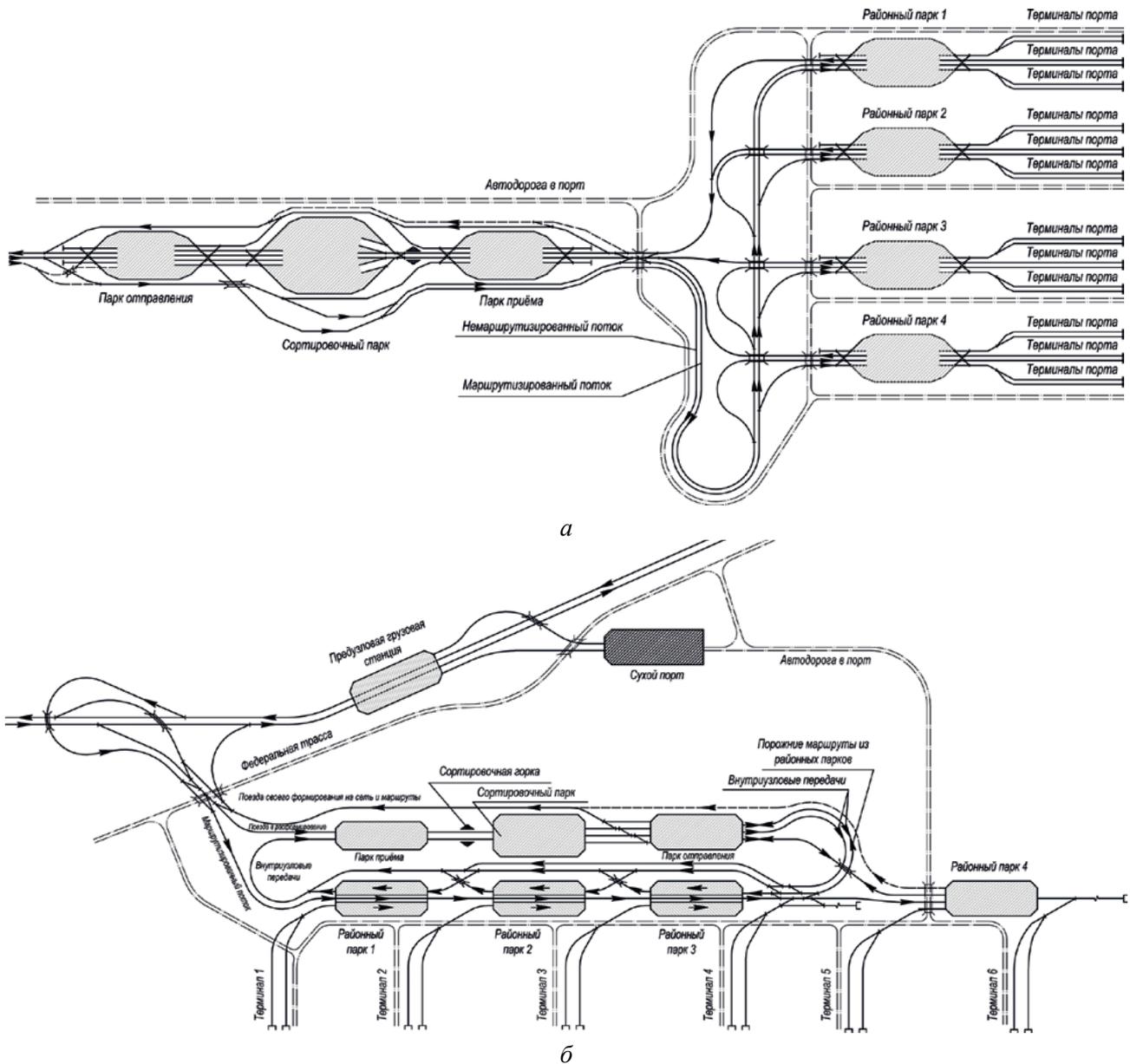


Рис. 6. Схемы компоновки обслуживающей порт железнодорожной инфраструктуры:
 а — перпендикулярно береговой линии; б — параллельно береговой линии

зации кольцевого движения от схемы с перпендикулярным расположением. Маршрутизированный поток будет поступать на терминалы порта в обход сортировочной станции против часовой стрелки. Следующий в направлении порта немаршрутизированный вагонопоток будет заводиться на сортировочную станцию, от которой уже по часовой стрелке будет поступать на портовые терминалы. Выводимый из районных парков порожний подвижной состав продолжает

свое движение по часовой стрелке в парк приема сортировочной станции.

Предложенные схемы позволяют реализовать ориентировочные объемы перевалки в портах до 100–120 млн т в год с минимальными затратами на переработку и пропуск поездов в портовом железнодорожном узле.

К особенностям современных морских портов можно отнести наличие на удалении от них терминалов, работающих по принципу «сухих

портов». Для обслуживания «сухих портов» на ближних и дальних подходах могут сооружаться предузловые грузовые станции (см. рис. 6, б). Обычно «сухие порты» имеют прямой выход на терминалы порта по обычной железной дороге, при этом технологически предусматривается возможность организации блок-поездов и автомобильной дороги, как правило, 1-й категории, для объемов перевозки до 40 млн т в год. При наличии «сухого порта» на контейнерном терминале непосредственно в порту, как правило, организуется только оперативная зона для накопления судовой партии и выгрузки контейнеров для прибывающих судов. Складская зона со стеками для накопления контейнеров по назначениям организуется в «сухом порте». Доставка контейнеров в порт в оперативную зону осуществляется либо блок-трейнами (работающими по принципу закольцованных маршрутов-вертушек), либо автотранспортом, либо комбинировано. Предузловая станция, обслуживающая «сухой порт», должна иметь специальный накопительный парк для создания резерва фитинговых платформ.

На основании изложенного можно заключить следующее:

1. Для содержащихся в технической и учебной литературе схемных решений железнодорожного обслуживания портов не установлена четкая граница расчетных объемов перевалки грузов между железнодорожным и водным транспортом. Содержащиеся в рассмотренных источниках [5–8] данные позволяют заключить, что предусмотренный ими перерабатываемый грузооборот портов может превышать 15 млн т в год, но не кратно.

2. Анализ объемов перевалки некоторых портов Арктического, Балтийского, Азово-Черноморского и Дальневосточного бассейнов показал, что имеются морские порты, объемы перевалки которых превышают 15 млн т в год в 9–10 раз.

3. В имеющихся типовых схемах железнодорожного обслуживания портов (см. рис. 1)

сортировочная станция с портовой станцией и с районными парками соединяется однопутными перегонами. Доработка этих схем с учетом строительства вторых путей на перегонах для освоения больших объемов грузооборота нерациональна, так как вызовет усложнение конструкций горловин с наличием большого количества враждебных пересечений. Таким образом, своевременным становится вопрос о разработке новых схем железнодорожного обслуживания портов при больших объемах перевалки.

4. С учетом объемов перевалки в ряде портов более 100 млн т в год при разработке новых схем железнодорожного обслуживания портов следует исходить из обеспечения поточности передвижения поездов и передач между сортировочной станцией и терминалами. Такую поточность можно обеспечить в результате организации кольцевого движения в портовом узле.

5. В современных условиях направление сортировки вагонов должно выбираться из порта на внешнюю сеть, что согласуется с направлением следования преимущественно перерабатываемого вагонопотока и снижает пробег вагонов в пределах транспортного узла.

6. Терминалы, работающие по технологии «сухой порт» и обслуживающие их грузовые станции, становятся неотъемлемым элементом транспортной инфраструктуры и должны учитываться при разработке типовых схемных решений. Помимо железнодорожной составляющей в составе типовых решений следует предусматривать автомобильные дороги для обеспечения перевозок между терминалами порта и «сухим портом».

В статье предложены две новые схемы компоновки обслуживающей порт железнодорожной инфраструктуры, позволяющие обеспечить расчетный грузооборот порта — 100 млн т в год и более. В последующем при издании нормативной и учебной литературы приведенные на рис. 6 схемы могут быть использованы в качестве типовых решений.

Список источников

1. Рыбин П. К. Особенности развития припортовых железнодорожных узлов: оптимизация инфраструктурных решений и технология взаимодействия видов транспорта / П. К. Рыбин, М. В. Четчуев // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». — 2022. — № 7. — С. 68–71.

2. Четчуев М. В. Оценка экономической целесообразности применения вариантов перевалки груза в смешанном железнодорожно-водном сообщении / М. В. Четчуев, В. Г. Четчуева // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2018: материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2018 года. — Т. 1. — СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2018. — С. 105–108.

3. Иванкова Л. Н. Принципы взаимодействия транспорта при проектировании «сухих портов» / Л. Н. Иванкова, А. Н. Иванков, А. Д. Шобухов; под общ. ред. Г. М. Биленко, И. А. Трушиной // Современные методы и принципы управления перевозочным процессом на транспорте: сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 17–18 мая 2023 года. — М.: Российский университет транспорта, 2023. — С. 115–120.

4. Иванкова Л. Н. Влияние способов обслуживания морских портов железнодорожным транспортом на путевое развитие припортовых станций / Л. Н. Иванкова, А. Н. Иванков, М. Ю. Герасимова, А. М. Орлов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов. — М.: Российский университет транспорта, 2022. — С. 52–57.

5. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм

(утв. заместителем министра путей сообщения РФ С. А. Гришиным 28.07.2000 № ЦД-858). — М.: Техинформ, 2001. — 255 с.

6. Проектирование железнодорожных станций и узлов: справочное и методическое руководство / Под ред. А. М. Козлова, К. Г. Гусевой. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1980. — 592 с.

7. Апатцев В. И. Железнодорожные станции и узлы: учебник / В. И. Апатцев, Ю. И. Ефименко, Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко и др. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. — 855 с.

8. Сабодаш О. А. План морского порта: в 4 ч. Ч. 2. Оборудование морского порта: учебное пособие для вузов / О. А. Сабодаш, П. С. Корнюшин. — Владивосток: Издательство Дальневосточного федерального университета, 2022. — 55 с.

9. Грузооборот морских портов России за 2024 год сократился на 2,3 % // Морские вести России. — URL: <https://morvesti.ru/news/1679/113541/> (дата обращения: 12.07.2025).

Дата поступления: 17.07.2025

Решение о публикации: 21.08.2025

Контактная информация:

РЫБИН Петр Кириллович — канд. техн. наук, доц.;
rybin@pgups.ru

ЧЕТЧУЕВ Максим Владимирович — канд. техн. наук,
доц.; mts@pgups.ru

ИВАНКОВ Алексей Николаевич — канд. техн. наук,
доц.; aivankov@yandex.ru

ВИННИК Андрей Дмитриевич — аспирант;
geforcepio@gmail.com

New Principles for the Layout of Railway Infrastructure Serving Seaports

P. K. Rybin¹, M. V. Chetchuev¹, A. N. Ivankov², A. D. Vinnik¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²“PSK Techproekt” LLC., 21, bld. 1, office 305, 3rd Krasnoselsky per., Moscow, 107140, Russian Federation

For citation: Rybin P. K., Chetchuev M. V., Ivankov A. N., Vinnik A. D. New Principles for the Layout of Railway Infrastructure Serving Seaports // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 584–593. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-584-593

Summary

Purpose: The design solutions and layout principles of the railway infrastructure serving the ports contained in the technical and educational literature have not been revised for a considerable period. Significant changes have occurred, in terms of both the organization of the work of railway transport, and its interaction with water transport. Furthermore, the noteworthy escalation in transshipment volumes across numerous seaports should be given due consideration. These circumstances necessitate a thorough revision and updating of the current principles that govern the configuration of railway infrastructure serving ports. **Methods:** The studies were conducted using a retrospective and system analysis of the schemes and principles of the railway infrastructure layout around seaports, as well as the port node operation technologies. **Results:** The existing standard solutions are inadequate in terms of cargo turnover in several Russian seaports. It has been determined that the development of new layout schemes for railway infrastructure with significant port cargo turnover should be undertaken with consideration for the flow of train and shunting movements. It has been determined that current principles for organizing the work of connecting points involve the arrangement of “dry ports”, the presence of which is not provided for by the existing design solutions. **Practical significance:** Proposed changes to the layout of the railway infrastructure servicing the seaports have been formulated. Implementation of these proposals will create new standard solutions.

Keywords: Railway station, seaport, terminal, transshipment volume, scheme/layout solutions, traffic management.

References

1. Rybin P. K., Chetchuev M. V. Osobennosti razvitiya priportovykh zheleznodorozhnykh uzlov: optimizatsiya infrastrukturykh resheniy i tekhnologiya vzaimodeystviya vidov transporta [Features of the development of port railway junctions: optimization of infrastructure solutions and technology of interaction between modes of transport]. *Byulleten' uchenogo soveta AO "IERT"* [Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"]. 2022, Iss. 7, pp. 68–71. (In Russian)

2. Chetchuev M. V., Chetchueva V. G. Otsenka ekonomicheskoy tselesoobraznosti primeneniya variantov perevalki gruzov v smeshanom zheleznodorozhno-vodnom

soobshchenii [Assessment of the economic feasibility of using cargo transshipment options in mixed railway and water transport]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2018: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport of Russia: problems and prospects — 2018: materials of the international scientific and practical conference. Saint Petersburg, November 13–14, 2018]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy universitet Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy Publ., 2018, vol. 1, pp. 105–108. (In Russian)

3. Ivankova L. N., Ivankov A. N., Shobukhov A. D. Printsipy vzaimodeystviya transporta pri proektirovani "sukhikh portov" [Principles of transport interaction in the design of "dry ports"]. *Sovremennye metody i printsipy upravleniya perevoznym protsessom na transporte: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Moskva, 17–18 maya 2023 goda* [Modern methods and principles of transportation process management in transport: collection of scientific and practical conference proceedings with international participation, Moscow, May 17–18, 2023]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2023, pp. 115–120. (In Russian)
4. Ivankova L. N., Ivankov A. N., Gerasimova M. Yu., Orlov A. M. Vliyaniye sposobov obsluzhivaniya morskikh portov zheleznodorozhnym transportom na putevoe razvitiye priportovykh stantsiy [Influence of methods of servicing seaports by railway transport on track development of port stations]. *Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Modern problems of improving the operation of railway transport: interuniversity collection of scientific works]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2022, pp. 52–57. (In Russian)
5. *Pravila i tekhnicheskie normy proektirovaniya stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm (utv. zamestitelem ministra putey soobshcheniya RF S. A. Grishinym 28.07.2000 № TsD-858)* [Rules and Technical Standards for the Design of Stations and Junctions on 1520 mm Gauge Railways (approved by Deputy Minister of Railways of the Russian Federation S. A. Grishin on July 28, 2000, No. CD-858)]. Moscow: Tekhinform Publ., 2001, 255 p. (In Russian)
6. *Proektirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov: spravochnoe i metodicheskoe rukovodstvo; pod red. A. M. Kozlova, K. G. Gusevoy, 2-e izd., pererab. i dop.* [Design of Railway Stations and Junctions: Reference and Methodological Guide; ed. by A. M. Kozlov, K. G. Guseva, 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1980. 592 p. (In Russian)
7. Apatsev V. I., Efimenko Yu. I., Pravdin N. V., Vakulenko S. P. et al. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly: uchebnik* [Railway stations and nodes: textbook]. Moscow: Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2014. 855 p. (In Russian)
8. Sabodash O. A., Korniyushin P. S. *Plan morskogo porta: v 4 ch. Ch. 2. Oborudovaniye morskogo porta: uchebnoye posobie dlya vuzov* [Port plan: in 4 parts. Part 2. Equipment of the seaport: textbook for universities]. Vladivostok: Izdatel'stvo Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta Publ., 2022. 55 p. (In Russian)
9. Gruzooborot morskikh portov Rossii za 2024 god sokratilsya na 2,3% [The cargo turnover of Russian seaports decreased by 2.3% in 2024]. *Morskie vesti Rossii* [Russian Maritime News]. Available at: <https://morvesti.ru/news/1679/113541/> (accessed: July 12, 2025). (In Russian)

Received: July 17, 2025

Accepted: August 21, 2025

Author's information:

Petr K. RYBIN — PhD in Engineering, Associate Professor; rybin@pgups.ru

Maksim V. CHETCHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; mts@pgups.ru

Alexey N. IVANKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; aivankov@yandex.ru

Andrey D. VINNIK — Postgraduate Student; geforcepio@gmail.com

УДК 629.4.017

К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда при выполнении тяговых и тормозных расчетов

Д. Н. Курилкин¹, А. В. Исаев², В. Ф. Танаев³, В. Г. Погудин⁴, А. А. Романова¹

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

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29

³ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 107174, Москва, ул. Новая Басманная, 2/1, стр. 1

⁴Служба вагонного хозяйства Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 191036, Санкт-Петербург, Невский пр., 85, литера Ф

Для цитирования: Курилкин Д. Н., Исаев А. В., Танаев В. Ф., Погудин В. Г., Романова А. А. К вопросу учета инерционности тормозной системы грузового поезда при выполнении тяговых и тормозных расчетов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 594–604. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-594-604

Аннотация

Цель: Интенсификация грузовых перевозок требует все более точного прогнозирования траектории движения поездов. Однако до сих пор не существует единого подхода к определению тормозных сил в грузовом поезде при отпуске тормозов, что существенно снижает точность расчетов в этом режиме движения. Кроме того, действующие нормативы ограничивают возможность длительного использования режима тяги после торможения и отпуска. **Методы:** В работе выполнен статистический анализ данных записей автономных устройств регистрации пневматических и динамических процессов в грузовом поезде разработки АО «ВНИИЖТ» и модельный эксперимент по определению параметров отпускных процессов. **Результаты:** Разработана методика, позволяющая рассчитывать характер изменения тормозных сил в процессе отпуска для грузовых поездов различной длины, после различных ступеней служебного торможения. Математически доказана статистическая значимость полученных результатов. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют значительно улучшить точность прогнозирования траектории движения поезда и расширить возможности управления в тяговых режимах. Это способствует созданию более совершенных систем автоведения, а также увеличению скоростей движения и сокращению межпоездных интервалов.

Ключевые слова: Тормозные процессы, тормозные расчеты, отпуск грузовых поездов, время отпуска тормозов, тормозные силы.

Одним из вопросов, решение которого вызывает существенные затруднения при выполнении тяговых расчетов с грузовыми поездами, является порядок определения тормозной силы при использовании пневматического торможения.

Тормозные силы B_T , действующие на поезд при пневматическом торможении, могут быть определены из выражения [1–3]:

$$B_T = \sum K_p^k \cdot \varphi_{kp}^k + \sum K_p^u \cdot \varphi_{kp}^u ; \quad (1)$$

где $\sum K_p^k$ и $\sum K_p^ч$ — соответственно суммарное расчетное нажатие всех композиционных и чугунных колодок в поезде на колесные пары (Н); $\varphi_{кр}^k$, $\varphi_{кр}^ч$ — расчетные коэффициенты трения композиционных и чугунных тормозных колодок.

Расчетные коэффициенты трения и силы нажатия тормозных колодок определяются по известным зависимостям [1–3], учитывающим конструктивные параметры тормозных рычажных передач, и зависят от величин давлений в тормозных цилиндрах подвижного состава.

Наиболее сложен при определении тормозных сил учет инерционности работы пневматической тормозной системы поезда, выражающейся в длительном и неодновременном процессе наполнения тормозных цилиндров локомотивов и вагонов, а также в длительном процессе отпуска тормозов подвижного состава, во время которого использование тяговых режимов управления поездом не допускается, а тормозная сила постепенно уменьшается до нуля.

Теоретическому и практическому определению характера изменения тормозных сил в процессе наполнения тормозных цилиндров посвящено большое число исследований [1–7]. В целом при определении характера наполнения тормозных цилиндров может быть использована стандартная методика «Правил тяговых расчетов», приведенная в [1].

Особым вопросом, требующим уточнения, является характер изменения тормозной силы в процессе отпуска тормозов. В нормативно-справочной литературе [1–4] указано, что время полного отпуска и зарядки тормозов должно быть принято 90–120 с при регулировочном служебном торможении грузовых поездов и 30–60 с при регулировочном торможении пассажирских поездов. Результаты ряда исследований показывают [6–11], что скорость распространения отпускной волны в грузовом поезде зависит от целого

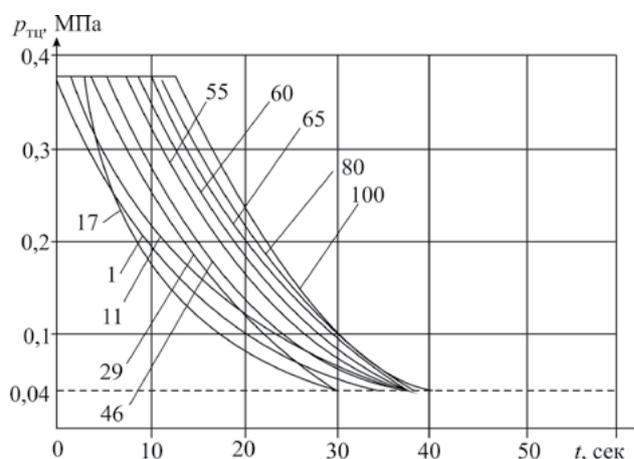
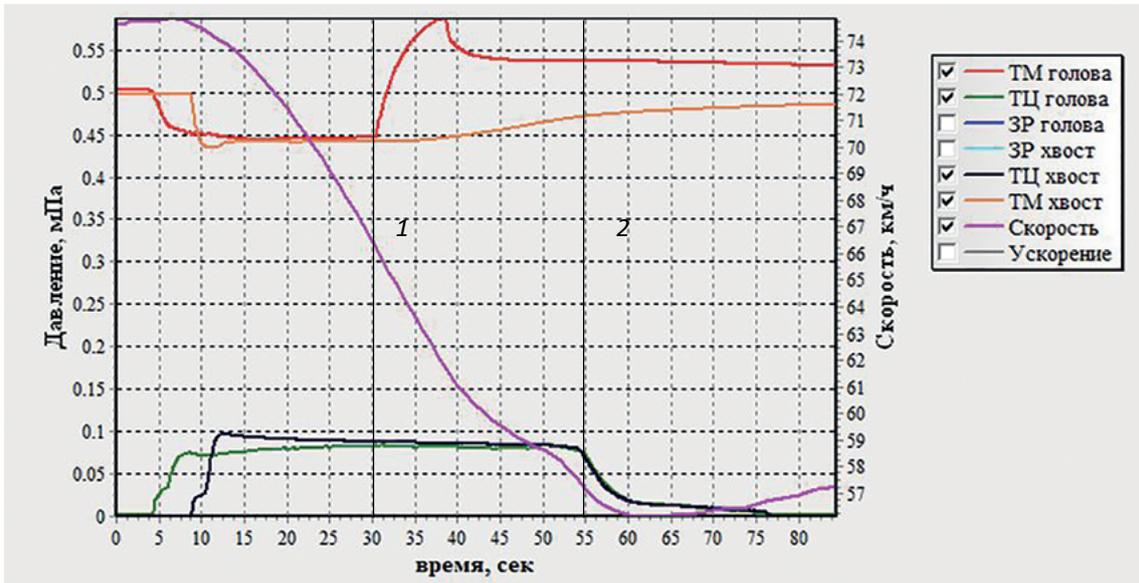


Рис. 1. Диаграмма отпуска тормозов в грузовом поезде из 100 вагонов после полного служебного торможения

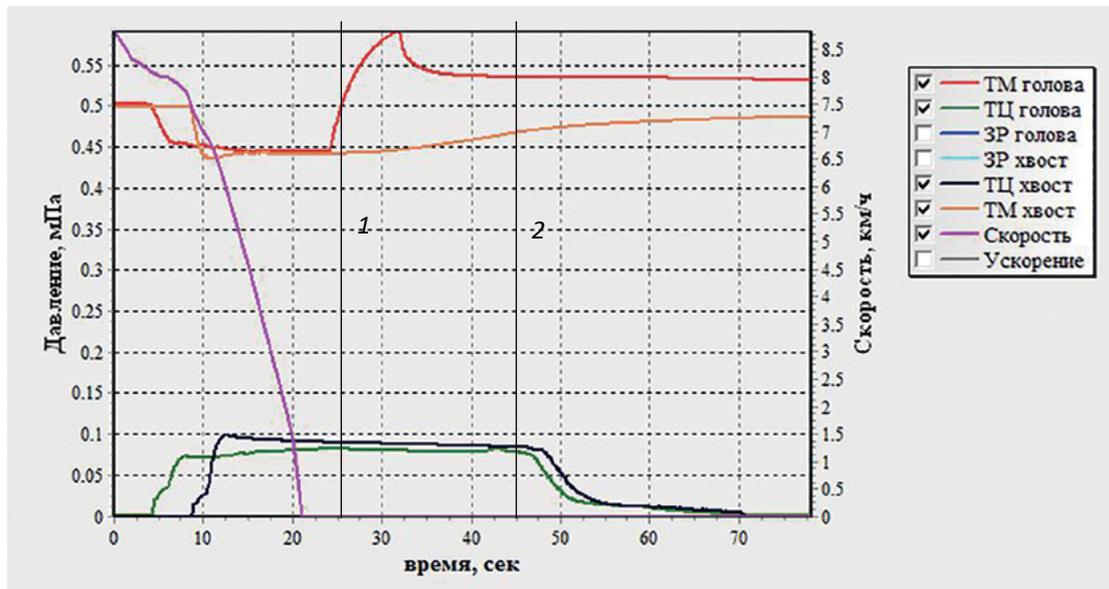
ряда факторов и по разным оценкам составляет 50–70 м/с. Как следует из приведенных в [10] диаграмм наполнения и опорожнения тормозных цилиндров (рис. 1), время непосредственно отпуска тормозов одного вагона после полного служебного торможения не превышает 40–50 с.

Между тем эти результаты были получены для случаев применения полного служебного и экстренного торможения. Кроме того, данные, приведенные в работах [1–3, 10] получены более 20 лет назад. С тех пор устройство тормозных систем грузовых вагонов претерпело существенные изменения [12].

Для получения актуальной информации о переходных процессах в тормозной системе грузового поезда в процессе отпуска после регулировочных торможений были проанализированы записи автономных устройств регистрации пневматических и динамических процессов в грузовом поезде (АУР) разработки АО «ВНИИЖТ». Были проанализированы результаты 14 опытных поездок с поездами, состоящими из четырехосных грузовых вагонов. При этом составы поездов были сформированы из четырехосных цистерн или полувагонов длиной 12,2–14,3 м. Число вагонов в составах колебалось от 65 до 70. Анализировались режимы служебного регулировоч-



а



б

Рис. 2. Записи процесса регулировочного торможения системой автономных устройств регистрации пневматических и динамических процессов в грузовом поезде маршрута Алтайская — Карасук

ного торможения одной ступенью со снижением давления в тормозной магистрали $0,6\text{--}0,7 \text{ кгс/см}^2$ ($0,06\text{--}0,07 \text{ МПа}$). Опытные поездки осуществлялись на Западно-Сибирской и Октябрьской железных дорогах — филиалах ОАО «РЖД» в 2022–2024 гг. В общей сложности было проанализировано 165 измерений регулировочного служебного торможения грузовых поездов.

Пример записи процесса торможения и отпуска поезда системой АУР от 22.08.2023 по маршруту Алтайская — Карасук приведен на рис. 2. Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 2, интервал времени между моментом постановки ручки крана машиниста в отпускное положение (линия 1) и моментом начала отпуска тормозов в поезде (линия 2) составляет порядка 20–25 с.

Однако стоит отметить, что в данном случае не совсем корректно считать данный интервал временем распространения отпускной волны, так как отпуск тормозов в головном и хвостовом вагонах поезда происходит или практически синхронно (рис. 2, *а*), или с разницей во времени не более 3 с (рис. 2, *б*). При этом на протяжении длительного времени с момента начала отпуска давление в тормозных цилиндрах неизменно, а спустя 20–25 с происходит его уменьшение во всех вагонах поезда с небольшой разницей по времени. Аналогичные результаты получены в 9 поездках, причем в некоторых случаях тормоза хвостового вагона отпускали раньше, чем головного.

Отличный от вышеописанного результат был получен в пяти поездках (37% случаев), где между временем отпуска в головных и хвостовых вагонах наблюдается существенная разница (от 10 до 25 секунд) по времени протекания отпускных процессов.

Для характеристики отпускных процессов предлагается использовать следующие параметры (интервалы времени):

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов головного вагона $t_{нг}$;

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до окончания отпуска тормозов головного вагона $t_{кг}$;

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов хвостового вагона $t_{нх}$;

– от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до окончания отпуска тормозов хвостового вагона $t_{кх}$.

Полученные по результатам обработки 165 записей статистические характеристики приведены в таблице.

В соответствии с методом Е. И. Пустыльника [13] для того, чтобы закон распределения случайных величин при 165 измерениях мог считаться

Характеристика отпускных процессов в грузовом поезде после ступени служебного торможения 0,6–0,7 кгс/см²

| Параметр | $t_{нг}$ | $t_{кг}$ | $t_{нх}$ | $t_{кх}$ |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Математическое ожидание, с | 10,1 | 33,5 | 18,1 | 39,3 |
| Среднеквадратичное отклонение, с | 3,5 | 5,6 | 5,1 | 6,9 |
| Асимметрия | 0,12 | 0,04 | 0,47 | 0,4 |
| Эксцесс | –0,07 | 0,05 | 0,07 | –0,06 |

нормальным, асимметрия не должна превышать 0,56, а эксцесс — 0,14. Как видно из табл. 1, все величины соответствуют указанным условиям.

С учетом того, что математическое ожидание $t_{нг}$ составляет более 50 % от математического ожидания $t_{нх}$, а разница между математическими ожиданиями $t_{кг}$ и $t_{кх}$ составляет менее 20 %, то представляется корректным взамен классического понимания скорости распространения отпускной волны $v_{ов}$ (м/с), равной:

$$v_{ов} = \frac{L_{тм}}{t_{нх}}, \quad (2)$$

где $L_{тм}$ — длина тормозной магистрали, м;

использовать термин «скорость передачи отпускной волны» $v_{пов}$ (м/с), которая равна:

$$v_{пов} = \frac{L_{тм}}{(t_{нх} - t_{нг})}. \quad (3)$$

В связи с длительным срабатыванием воздухораспределителей на отпуск данный параметр будет в меньшей степени зависеть от длины тормозной магистрали, и с учетом того, что длина тормозной магистрали $L_{тм}$ при проведении испытаний колебалась от 780 до 1030 м, получим среднее значение $v_{пов}$ (км/ч), равное 110 м/с.

Чтобы оценить время завершения отпуска тормозов в составах грузовых поездов различной длины, введем понятие скорости завершения отпуска $v_{зоб}$, определяемой по зависимости:

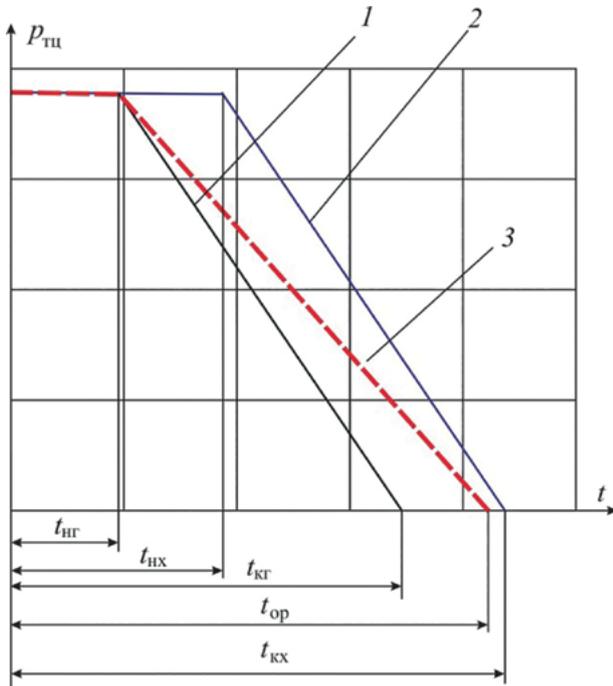


Рис. 3. Расчетная диаграмма отпуска тормозных цилиндров:

$p_{тц}$ — давление в тормозном цилиндре;
 1 — отпуск тормоза первой единицы подвижного состава; 2 — отпуск тормоза последней единицы подвижного состава; 3 — расчетная диаграмма отпуска тормоза поезда

$$v_{зоб} = \frac{L_{тм}}{(t_{кк} - t_{гк})} \text{ м/с.} \quad (4)$$

Значение скорости завершения отпуска $v_{зоб}$ составит порядка 156 м/с.

В связи с ограниченным количеством информации о тормозных средствах поезда, можно считать характер снижения давления линейным и использовать расчетную схему, приведенную на рис. 3.

В соответствии с расчетной схемой усредненное по поезду давление в тормозных цилиндрах подвижного состава $p_{ср}$ в процессе отпуска может быть определено по зависимости:

$$\text{если } t_o \leq t_{нг}, \text{ то } p_{ср} = p_{ср}^T;$$

$$\text{если } t_{нг} \leq t_o \leq t_{оп}, p_{ср} = p_{ср}^T \frac{t_{оп} - t_o}{t_{оп} - t_{нг}}; \quad (5)$$

$$\text{если } t_o \geq t_{оп}, \text{ то } p_{ср} = 0;$$

где $p_{ср}^T$ — среднее давление в тормозных цилиндрах поезда в конце торможения;

t_o — время, прошедшее с момента постановки органа управления тормозами в отпускное положение;

$t_{оп}$ — расчетное время отпуска тормозных цилиндров в среднем по поезду, определяемое по зависимости:

$$t_{оп} = t_{кг} + \frac{1}{2}(t_{нк} - t_{нг}) + \frac{1}{2}(t_{кк} - t_{кг}). \quad (6)$$

Используемые в зависимости (6) интервалы времени: $t_{нг}$ (от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов головного вагона) и $t_{кг}$ (до окончания отпуска тормозов головного вагона) — можно считать независимыми от длины состава грузового поезда и принять равными математическому ожиданию данных величин: 10,1 и 33,5 с соответственно.

Интервалы времени от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до начала отпуска тормозов хвостового вагона и от момента постановки органа управления тормозами поезда в отпускное положение до окончания отпуска тормозов хвостового вагона зависят от длины состава поезда и после элементарных преобразований зависимостей (3) и (4) могут быть определены исходя из следующих соотношений:

$$t_{нк} = t_{нг} + \frac{L_{тм}}{v_{пов}}; \quad (7)$$

$$t_{кк} = t_{кг} + \frac{L_{тм}}{v_{зоб}}. \quad (8)$$

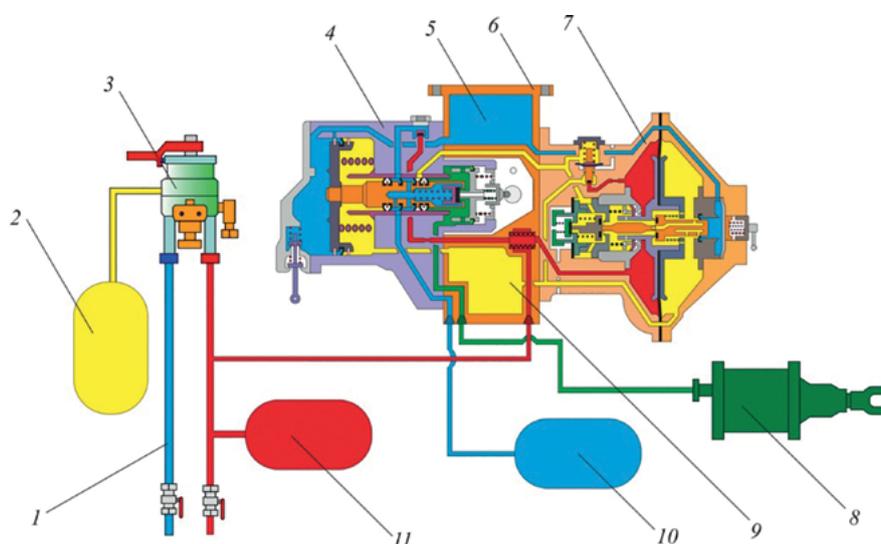


Рис. 4. Пневматическая схема стенда для проверки работы воздухораспределителя грузового типа:

- 1 — питательная магистраль (ПМ); 2 — уравнивающий резервуар (УР); 3 — кран машиниста усл. № 394-002; 4 — главная часть воздухораспределителя усл. № 270-023; 5 — рабочая камера воздухораспределителя (РК); 6 — двухкамерный резервуар воздухораспределителя усл. № 295-001; 7 — магистральная часть воздухораспределителя усл. № 483М-010; 8 — тормозной цилиндр усл. № 188Б; 9 — золотниковая камера воздухораспределителя (ЗК); 10 — запасной резервуар; 11 — объем тормозной магистрали

Представленные в таблице результаты справедливы для ступени торможения 0,6–0,7 кгс/см². Для определения влияния величины ступени торможения в лаборатории «Автоматические тормоза подвижного состава» (ауд. 4-104 ФГБОУ ВО ПГУПС) на стенде для испытания тормозов грузового типа была выполнена серия экспериментов по оценке влияния ступени торможения на время отпуска одиночного воздухораспределителя грузового типа. Принципиальная схема стенда показана на рис. 4, а его общий вид показан на рис. 5 (фото сделано Д. Н. Курилкиным).

В соответствии с требованиями федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» для измерения и фиксации значений величин давлений в элементах стенда параллельно с манометрами в схеме были размещены датчики давления, фиксирующие изменение давления в ПМ, УР, ТМ, ТЦ, ЗР, ЗК и РК воздухораспределителя. Сигнал от датчиков дав-

ления передается на ПК, где при помощи программы, разработанной в среде Delphi, происходит отображение их фиксации с частотой 10 раз в секунду. Результаты экспериментов сохраняются в виде табличных записей в файлы формата MS Excel. Для получения статистически значимой картины эксперимента было выполнено 85 ступеней торможения и отпусков тормоза с величиной ступени $\Delta p_{\text{тм}}$ от 0,4 кгс/см² до 1,4 кгс/см².

При этом для уменьшения влияния характеристик конкретного воздухораспределителя на результаты экспериментов примерно через 20 измерений выполнялась замена главной и магистральной части воздухораспределителя на аналогичные элементы. Всего было использовано четыре главных и четыре магистральных части воздухораспределителей, что эквивалентно испытанию четырех воздухораспределителей усл. № 483М и А. При этом использовались узлы работоспособных тормозных приборов, прошед-

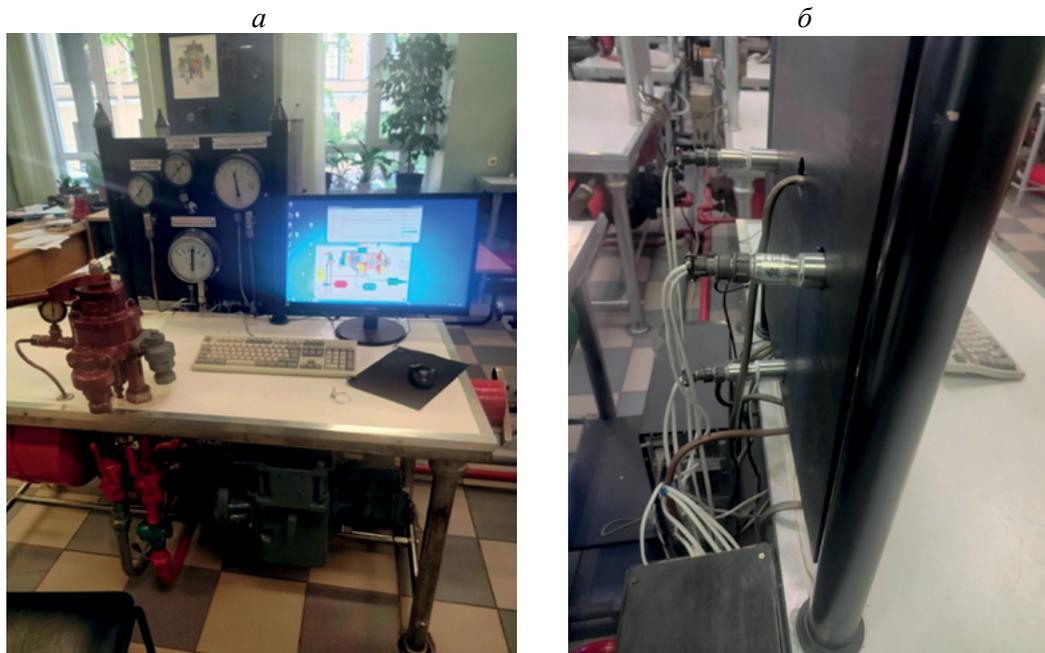


Рис. 5. Стенд для проверки действия воздухораспределителя грузового типа:
а — общий вид; *б* — подключение датчиков давления (фото сделано Д. Н. Курилкиным)

ших проверку на устройстве контроля воздухораспределителей грузовых вагонов.

Такой порядок испытаний, по мнению авторов, соответствует реальным условиям эксплуатации ВР на грузовых вагонах, так как двухкамерный резервуар меняется на вагонах только при капитальном ремонте, а главная и магистральная части проходят проверку на УКВР при плановом ремонте (по пробегу или через 2–3 года).

Так как испытания выполнялись на лабораторном стенде, условия эксплуатации которого существенно отличаются от условий реальной эксплуатации грузовых вагонов (плотность тормозной сети, температура, длина тормозной магистрали и т. п.), то результат оценивался через коэффициент K_p , равный отношению времени отпуска при фактической величине ступени торможения $t_{\text{оф}}$ ко времени отпуска при ступени торможения $0,65 \text{ кгс/см}^2$ $t_{0,65}$:

$$K_p = \frac{t_{\text{оф}}}{t_{0,65}}. \quad (9)$$

Результаты определения коэффициента K_p приведены на рис. 6. Для учета влияния величины ступени торможения на время отпуска все величины, приведенные в таблице, перед подстановкой в зависимости (6)–(9) должны умножаться на K_p .

Коэффициент K_p может быть аппроксимирован линейной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,853^{\wedge}$:

$$K_p = 1,835 \cdot \Delta p_{\text{тм}} - 0,19. \quad (10)$$

При этом стоит учитывать, что зависимости (5)–(10) являются теоретическими и требуют дальнейшей проверки в реальных условиях эксплуатации.

На основании выполненных исследований можно прийти к следующим основным выводам:

1. В работе предложена методика определения времени отпуска тормозов грузового поезда при различной длине состава и величине ступени торможения, построенная на основании экспериментальных данных.

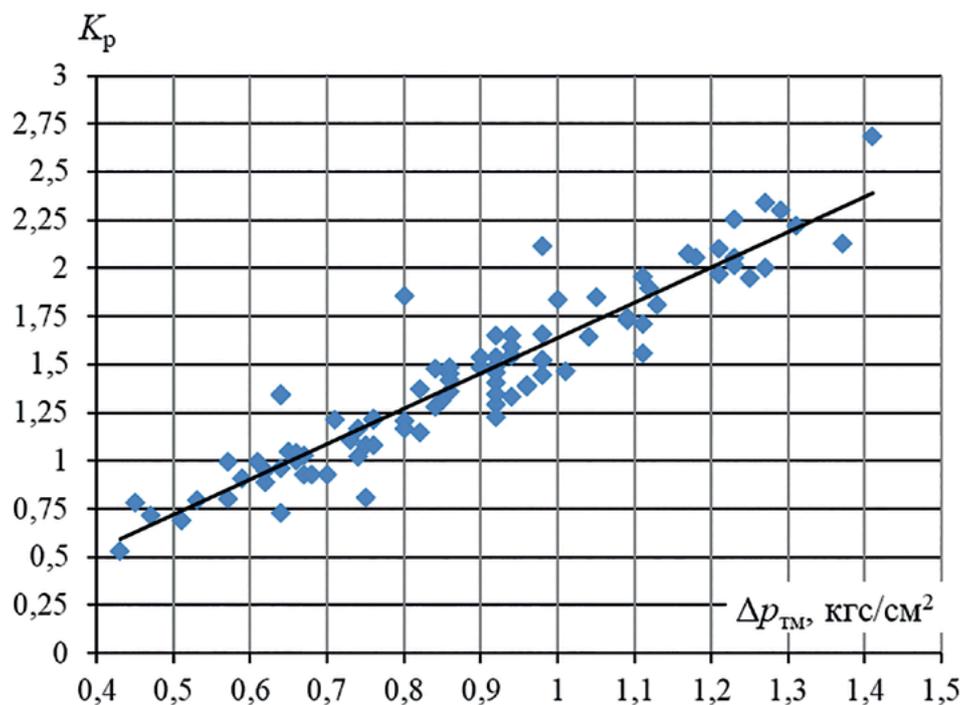


Рис. 6. Определение коэффициента влияния степени торможения на время отпуска тормозных цилиндров грузовых вагонов:
 Δp_{TM} — степень торможения, кгс/см²

2. Вместо скорости распространения тормозной волны целесообразно использовать термины «скорость передачи отпускной волны» и «скорость завершения отпускной волны».

3. В работе с помощью лабораторного эксперимента показано влияние степени служебного торможения на время отпуска тормозов поезда.

Список источников

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р / ОАО «РЖД». — М., 2016. — 514 с.

2. Гребенюк П. Т. Правила тормозных расчетов / П. Т. Гребенюк // Труды ВНИИЖТ. — М.: Интекст, 2004. — 112 с.

3. Гребенюк П. Т. Нормативы продольных сил и тормозных путей длинносоставных и скоростных поездов / П. Т. Гребенюк // Труды ВНИИЖТ. — М.: Интекст, 2007. — 240 с.

4. Никифоров Б. Д. Автоматизация управления торможением поездов / Б. Д. Никифоров, В. И. Головин, Ю. Г. Кутыев. — М.: Транспорт, 1985. — 263 с.

5. Худорожко М. В. Переход к вождению соединенных поездов одной локомотивной бригадой. Управление пневматическим торможением при отказах тормозного оборудования / М. В. Худорожко, И. А. Елисеев, С. А. Муров, А. В. Стельмашенко // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Локомотив. Электрический транспорт XXI век». — СПб.: ПГУПС, 2020. — С. 386–411.

6. Иноземцев В. Г. Параметры тормозных систем для поездов повышенной массы и длины / В. Г. Иноземцев, В. Ф. Ясенцев, Е. И. Кузьмина // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Исследование автотормозов железнодорожного подвижного состава. — М.: Транспорт, 1984. — С. 3–8.

7. Горин А. Ф. Определение основных характеристик тормозной системы вагонов, эксплуатируемых на

больших уклонах пути / А. Ф. Горин, А. В. Казаринов // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Исследование автотормозов железнодорожного подвижного состава. — М.: Транспорт, 1984. — С. 27–32.

8. Нехаев В. А. Оптимизация режимов ведения поезда с учетом критериев безопасности движения (методы и алгоритмы): дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / В. А. Нехаев. — Омск: ОмГУПС, 2000. — 353 с.

9. Попов В. Е. Об алгоритме отпуска пневматических тормозов / В. Е. Попов, Г. М. Елсаков, И. Г. Левин // Автоматизация управления тормозами поезда: межвуз. сб. науч. тр. — Свердловск: УрЭМИИТ, 1980. — С. 37–42.

10. Пытляков В. А. Результаты испытания автоматических тормозов грузовых поездов на Забайкальской железной дороге / В. А. Пытляков // Автоматизация управления тормозами поезда: межвуз. сб. науч. тр. — Свердловск: УрЭМИИТ, 1980. — С. 52–55.

11. Кулага А. А. Повышение эффективности работы тормозных систем длиннобазных контейнерных плат-

форм: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / А. А. Кулага. — М., 2019. — 120 с.

12. Соколов А. Б. Воздухораспределители: настоящее и перспективы / А. Б. Соколов // Железнодорожный транспорт. — 2006. — №8. — С. 73–75.

13. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. — М.: Наука, 1968. — 288 с.

Дата поступления: 30.07.2025

Решение о публикации: 21.08.2025

Контактная информация:

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук, доц.; kurilkin@pgups.ru

ИСАЕВ Александр Владимирович — канд. техн. наук; isaev@avtomashinist.ru

ТАНАЕВ Валерий Фаритович — lt@pgups.ru

ПОГУДИН Вениамин Григорьевич — lt@pgups.ru

РОМАНОВА Анна Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; anuromanova@inbox.ru

On the Issue of the Inertia Braking System of a Freight Train When Performing Traction and Braking Calculations

D. N. Kurilkin¹, A. V. Isaev², V. F. Tanaev³, V. G. Pogudin⁴, A. A. Romanova¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politechnicheskaya str., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

³JSC “Russian Railways”, 2/1, bld 1, Novaya Basmannaya str., Moscow, 107174, Russian Federation

⁴Railway Wagon Service of the Oktyabrskaya Railway, a branch of JSC Russian Railways, 85, Nevsky pr., Saint Petersburg, 191036, litera F

For citation: Kurilkin D. N., Isaev A. V., Tanaev V. F., Pogudin V. G., Romanova A. A. On the Issue of the Inertia Braking System of a Freight Train When Performing Traction and Braking Calculations // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 594–604. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-594-604

Summary

Purpose: In view of the intensification of freight transportation, there is an increasing imperative for enhanced accuracy in the forecasting of potential movement trajectories. Concurrently, a lack of a unified approach to the determination of the braking forces in a freight train during brake release persists. This results in a substantial

decline in the precision of calculations in this mode of operation. The prevailing regulatory framework does not permit the prolonged utilisation of traction mode after braking and releasing. **Methods:** The paper presents a statistical analysis of the autonomous device records of pneumatic and dynamic processes in a freight train developed by JSC VNIIZHT, as well as a model experiment to determine the release parameters. **Results:** A methodology has been developed to calculate the braking force changes during the release for freight trains of various lengths and after various service braking stages. The statistical significance of the obtained results has been mathematically proven. **Practical significance:** The results obtained will make it possible to significantly improve the accuracy of predicting the train's trajectory and increase the ability to control the train in traction modes. This will contribute to the design of enhanced automatic train operation systems, increase travel speeds and reduce inter-train intervals.

Keywords: Braking processes, braking calculations, release of freight trains, brake release time, braking forces.

References

1. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty: utverzhdeny rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12.05.2016 № 867r* [Rules for traction calculations for train operation: approved by the order of JSC Russian Railways dated 12.05.2016 № 867r]. Moscow: OAO "RZhD", 2016, 514 p. (In Russian)
2. Grebenyuk P. T. Pravila tormoznykh raschetov [Rules for braking calculations]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport]. Moscow: Intekst Publ., 2004, 112 p. (In Russian)
3. Grebenyuk P. T. Normativy prodol'nykh sil i tormoznykh putei dlinnosostavnykh i skorostnykh poezdov [Standards of longitudinal forces and braking distances for long and high-speed trains]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport]. Moscow: Intekst Publ., 2007, 240 p. (In Russian)
4. Nikiforov B. D., Golovin V. I., Kutyev Yu. G. *Avtomatizatsiya upravleniya tormozheniem poezdov* [Train braking control automation]. Moscow: Transport Publ., 1985, 263 p. (In Russian)
5. Khudorozhko M. V., Eliseev I. A., Murov S. A., Stelmashenko A. V. Perekhod k vozhdenniu soedinennykh poezdov odnoi lokomotivnoi brigadoi. Upravlenie pnevmaticheskimi tormozheniem pri otkazakh tormoznogo oborudovaniia [Transition to driving combined trains by one locomotive crew. Pneumatic braking control at brake equipment failures]. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Lokomotiv. Elektricheskii transport XXI vek"* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Locomotive. Electric Transport of the XXI Century"]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2020, pp. 386–411. (In Russian)
6. Inozemtsev V. G., Yasentsev V. F., Kuz'mina E. I. Parametry tormoznykh sistem dlya poezdov povyshennoy massy i dliny [Brake system parameters for high-mass and long trains]. *Sb. nauch. tr. VNIIZHT. Issledovanie avtotormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Coll. sci. tr. VNIIZhT. Study of automatic brakes of railway rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984, pp. 3–8. (In Russian)
7. Gorin A. F., Kazarinov A. V. Opredelenie osnovnykh kharakteristik tormoznoy sistemy vagonov, ekspluatiruemykh na bol'shikh uklonakh puti [Determination of basic characteristics of brake system of cars operated on steep gradients]. *Sb. nauch. tr. VNIIZHT. Issledovanie avtotormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Coll. sci. t. VNIIZhT. Study of automatic brakes of railway rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984, pp. 27–32. (In Russian)
8. Nekhaev V. A. *Optimizatsiya rezhimov vedeniya poezda s uchetom kriteriev bezopasnosti dvizheniya (metody i algoritmy): dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.07* [Optimization of train operation modes taking into account traffic safety criteria (methods and algorithms): dis. ... Doctor of Engineering Sciences: 05.22.07]. Omsk: OmGUPS Publ., 2000, 353 p. (In Russian)
9. Popov V. E., Elsakov G. M., Levin I. G. Ob algoritme otpuska pnevmaticheskikh tormozov [On the algorithm of pneumatic brake release]. *Avtomatizatsiya upravleniya tormozami poezda: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Automation of train brake control: interuniversity. coll. sci. t.]. Sverdlovsk: UrEMIIT Publ., 1980, pp. 37–42. (In Russian)

10. Pytlyakov V. A. Rezul'taty ispytaniy avtomaticheskikh tormozov gruzovykh poezdov na Zabaykalskoy zheleznoy doroge [Results of testing automatic brakes of freight trains on the Trans-Baikal railway]. *Avtomatizatsiya upravleniya tormozami poezda: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Automation of train brake control: interuniversity. collection of scientific papers]. Sverdlovsk: UrEMIIT Publ., 1980, pp. 52–55. (In Russian)

11. Kulaga A. A. *Povyshenie effektivnosti raboty tormoznykh sistem dlinnobaznykh konteynernykh platform: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.07* [Improving the efficiency of braking systems of long-base container platforms: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.22.07]. Moscow, 2019, 120 p. (In Russian)

12. Sokolov A. B. *Vozdukhoraspredeliteli: nastoyashchee i perspektivy* [Air distributors: present and prospects]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2006, Iss. 8, pp. 73–75. (In Russian)

13. Pustyl'nik E. I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy* [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 288 p. (In Russian)

Received: July 30, 2025

Accepted: August 21, 2025

Author's information:

Dmitry N. KURILKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; kurilkin@pgups.ru

Alexander V. ISAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; isaev@avtomashinist.ru

Valery F. TANAEV — It@pgups.ru

Veniamin G. POGUDIN — It@pgups.ru

Anna A. ROMANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; anyromanova@inbox.ru

УДК 624.044

Математическое моделирование блочной обделки тоннеля большого диаметра

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

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

Для цитирования: Ледяев А. П., Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Математическое моделирование блочной обделки тоннеля большого диаметра // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 605–615. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615

Аннотация

Цель: Выполнить оценку напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного перегонного тоннеля на участке Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена. **Методы:** Математическое моделирование методом конечных элементов, сравнение с результатами натурных геодезических измерений. **Результаты:** Выполнено моделирование обделки как монолитного кольца эквивалентной жесткости; выполнено моделирование обделки со стыками между блоками двумя способами: с помощью интерфейсов и упругих прокладок в стыках; результаты математического моделирования сопоставлены с результатами натурных геодезических измерений, в результате чего определен наиболее рациональный способ моделирования стыков блочной обделки; выполнена оценка напряженно-деформированного состояния с точки зрения запаса по прочности и по деформациям. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования конструкций сборных железобетонных обделок для тоннелей большого диаметра, а также на этапе эксплуатационного контроля технического состояния для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния обделки.

Ключевые слова: Тоннель, двухпутная обделка, тоннелепроходческий механизированный комплекс, математическое моделирование, метод конечных элементов.

Введение

Двухпутные тоннели метрополитена, пройденные тоннелепроходческим комплексом большого диаметра в толще разнородных четвертичных отложений, являются актуальной темой для научных исследований как с точки зрения вопросов проектирования, так и эксплуатации. Качественная сборка обделки из высокоточных блоков в теории должна обеспечивать работу тоннельной конструкции как единого целого, но на практике на участках тоннеля с ненадлежащим исполнением монтажных соединений блоков возможно появление сдвиговых деформаций и раскрытия стыков. Более

подробно такие дефекты в обделке двухпутного тоннеля метрополитена описаны в [1]. Для оценки их влияния на напряженно-деформированное состояние обделки следует прибегнуть к математическому моделированию методом конечных элементов.

Сдвиговые деформации и раскрытие стыков приводят к нарушению целостности обделки, и отразить этот процесс в механике сплошных сред является нетривиальной задачей. В практике математического моделирования расчетчики прибегают к помощи так называемых «математических костылей» — специальных приемов, позволяющих, находясь формально в области действия

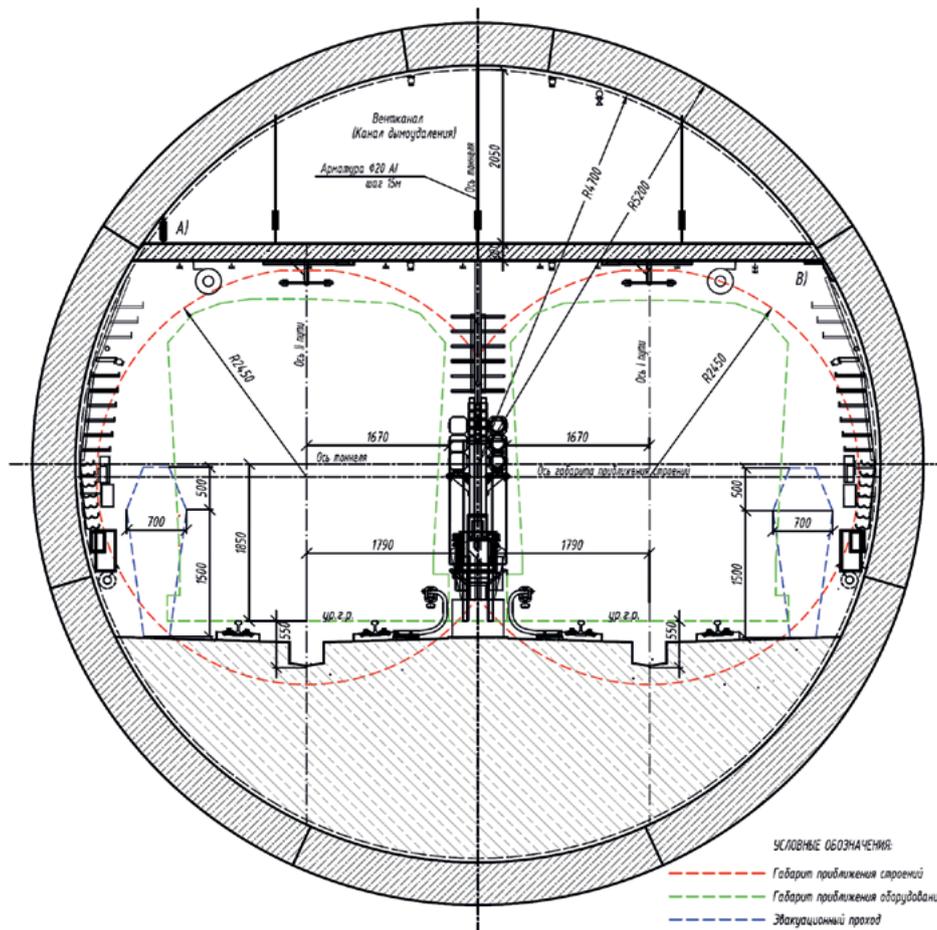


Рис. 1. Поперечное сечение перегонного тоннеля Невско-Василеостровской линии:
A — крепление на подвесе; *B* — крепление на опорном столике

законов механики сплошной среды, моделировать различные структурные нарушения.

Целью настоящего исследования являлась оценка напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного перегонного тоннеля на участке Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена. Для осуществления цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить моделирование обделки как монолитного кольца эквивалентной жесткости для рассмотрения случая надлежащей работы радиальных стыков обделки.

2. Выполнить моделирование обделки из отдельных блоков с разными вариантами учета стыков между ними для оценки влияния некачественной сборки колец.

3. Выполнить оценку прочности обделки и предложить деформационный критерий работоспособности.

4. Сопоставить результаты математического моделирования с натурными геодезическими измерениями, выполненными на стадии эксплуатации двухпутного тоннеля.

Материалы и методы

Двухпутный участок перегонного тоннеля метрополитена выполнен с применением высокоточной сборной железобетонной водонепроницаемой обделки наружным диаметром 10 300 мм, с толщиной блока 450 мм. Ширина кольца обделки изменяется от 1760 до 1840 мм для возможности поворота трассы тоннеля как в профиле, так и в плане. При

моделировании ширина кольца принималась равной среднему значению — 1800 мм. Кольцо обделки состоит из 7 блоков сплошного сечения: четырех нормальных, двух смежных и одного замкового. Водонепроницаемость обделки обеспечивается гидроизолирующими уплотнительными прокладками в стыках, обжимаемых при монтаже обделки и находящихся в упругосжатом состоянии в течение всего периода эксплуатации обделки.

Внутреннее пространство тоннеля разделено на два яруса — зону движения поездов и вентиляционный канал — монолитным железобетонным перекрытием толщиной 200 мм по металлическим балкам. Балки крепятся к обделке тоннеля через закладные детали в центральной части на трех подвесах, а по торцам — на подвесах либо на опорных столиках (рис. 1, *A* и *B* соответственно). Нижняя четверть тоннеля заполнена путевым бетоном жесткого основания.

Математическое моделирование проводилось в программном комплексе Midas GTS NX. 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 [2–6].

Физико-механические свойства строительных конструкций были описаны линейно-деформируемой моделью. Модуль упругости обделки был принят как для бетона класса В40, то есть $E = 36\,000$ МПа, а жесткого основания — как для бетона класса В30, то есть $E = 32\,500$ МПа. Коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$, объемный вес железобетона $\gamma = 24,5$ кН/м³.

В качестве инженерно-геологических условий были выбраны суглинки, наиболее характерные для четвертичных отложений Санкт-Петербурга. Свойства грунта были описаны моделью Мора — Кулона, физико-механические характеристики приняты следующими:

- модуль деформации $E = 7$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,37$,
- объемный вес $\gamma = 19$ кН/м³;
- сцепление $C = 14$ кПа;
- угол внутреннего трения $\varphi = 15^\circ$.

Рассматриваемая область грунтового массива должна быть достаточна, чтобы перекрыть зону влияния тоннельной выработки и тем самым исключить влияние границ области на величину рассчитываемых деформаций и напряжений в конструкции. Таким образом, граница влияния тоннельной выработки принята на расстоянии двух диаметров от края конструкции по ширине и одного по глубине. Глубина заложения обделки принята средней для трассы линии мелкого заложения метрополитена, то есть 10 м. Толщина модели принята равной ширине кольца обделки, то есть 1,8 м. Таким образом, размеры модели составили $50 \times 30 \times 1,8$ м.

Грунтовой массив и расположенная в нем конструкция была разбита на сеть объемных конечных элементов, соединенных между собой в узлах. Разбивка на конечные элементы массива выполнена со сгущением сетки вблизи конструкции (рис. 2).

На боковых границах массива установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений.

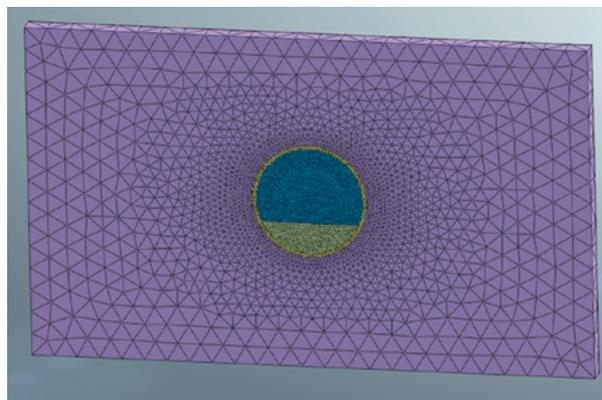


Рис. 2. Общий вид модели

Расчет выполнялся в два этапа. На первом этапе создавалось начальное напряженное состояние грунтового массива до проходки тоннеля. На этом этапе все группы конечных элементов имели свойства грунта. В конце этапа расчета полученные перемещения обнулялись. На втором этапе выполнялся монтаж кольца обделки. На этом этапе конечные элементы грунта внутри тоннеля деактивировались, а группам конечных элементов блоков и жесткого основания присваивались характеристики бетона.

Моделирование обделки было выполнено в трех постановках:

1. Моделирование обделки монолитным кольцом эквивалентной жесткости (случай исправной работы радиальных стыков обделки).
2. Моделирование обделки из отдельных блоков со стыками, допускающими проскальзывание.
3. Моделирование обделки из отдельных блоков со стыками, допускающими раскрытие.

1. Моделирование обделки монолитным кольцом эквивалентной жесткости

В зарубежной практике, в частности в немецких стандартах DIN-1045, в проверочных расчетах сборная обделка представляется как монолитное кольцо эквивалентной жесткости. Эквивалентная жесткость оценивается в зависимости от количества блоков в кольце и моментов инерции стыков по формуле:

$$I_{\text{мон}} = I_{\text{стыка}} + I_{\text{бл}} \left(\frac{4}{m} \right)^2, \quad (1)$$

где $I_{\text{бл}}$ — момент инерции блока обделки:

$$I_{\text{бл}} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1,8 \cdot 0,45^3}{12} = 0,0137 \text{ м}^4,$$

b — ширина кольца;

h — высота сечения блока;

$I_{\text{стыка}}$ — момент инерции стыка:

$$I_{\text{стыка}} = \frac{b \cdot h_1^3}{12} = \frac{1,8 \cdot 0,25^3}{12} = 0,0023 \text{ м}^4,$$

h_1 — рабочая высота стыка;

$m = 7$ — количество блоков в кольце (с учетом замкового блока).

Тогда приведенный к монолитной обделке момент инерции:

$$I_{\text{мон}} = I_{\text{стыка}} + I_{\text{бл}} \left(\frac{4}{m} \right)^2 = 0,0023 + 0,0137 \cdot 0,33 = 0,0068 \text{ м}^4.$$

Отсюда высота сечения приведенного кольца [7, 8]:

$$h_{\text{прив}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{\text{мон}}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 0,0068}{1,8}} = 0,356 \text{ м}.$$

По результатам расчета № 1 было проанализировано напряженно-деформированное состояние обделки. На рис. 3 показаны изополю вертикальных деформаций обделки.

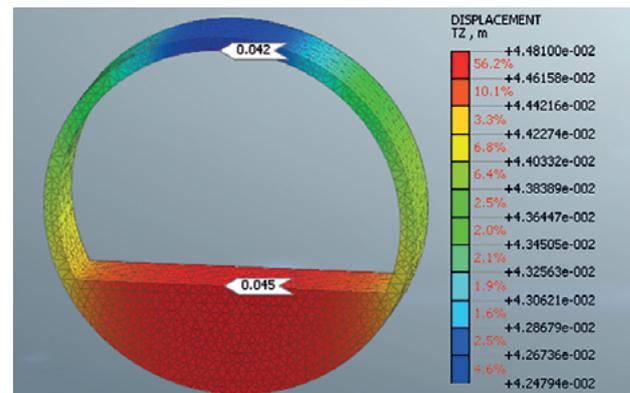


Рис. 3. Расчет № 1: изополю вертикальных деформаций обделки

Таким образом, в случае обеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки деформирование конструкции происходит следующим образом:

- практически равномерное поднятие (всплытие) тоннеля на величину ~ 40 мм;
- деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) составляет 3 мм.

2. Моделирование обделки из блоков со стыками, допускающими деформации

2.1. Моделирование обделки из блоков со стыками, допускающими проскальзывание

В данной постановке задачи моделировалось отсутствие болтовых связей и кольцевой шпонки в радиальных стыках обделки. Возможность смещения блоков друг относительно друга моделировалось установкой особого вида связей между конечными элементами — интерфейсами.

Было установлено, что наибольшие деформации возникают при расположении замкового блока в составе обделки под углом 15° к вертикали (рис. 4).

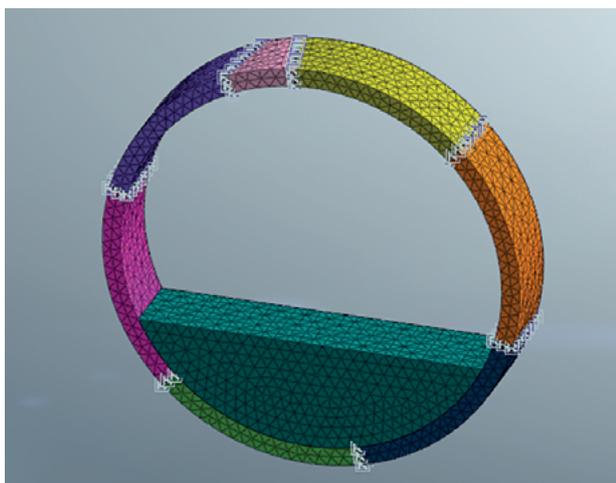


Рис. 4. Расчетная схема с интерфейсами в стыках

Свойства интерфейсов в стыках можно описать двумя параметрами: нормальным модулем жесткости (*Normal stiffness modulus*, K_n , кН/м³) и касательным модулем жесткости (*Shear stiffness modulus*, K_t , кН/м³).

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

Нормальный модуль жесткости K_n можно определить двумя способами.

В первом способе (в соответствии с разделом «Справка» программного комплекса Midas GTS NX) нормальный модуль жесткости определяется через модуль упругости контактирующих элементов:

$$K_n = E_{oed,i} / t_v, \quad (2)$$

где t_v — виртуальная толщина интерфейсного элемента, задаваемая в пределах 0,01–0,1 м, при этом наименьшее значение соответствует наибольшей разнице между контактирующими элементами; таким образом, в нашем случае $t_v = 0,1$ м;

$$E_{oed,i} = 2G_i(1 - \nu_i) / (1 - 2\nu_i), \quad (3)$$

где ν_i — коэффициент Пуассона интерфейсного элемента, принимаемый равным 0,45;

$$G_i = R G, \quad (4)$$

G — модуль сдвига бетона, кПа, определяемый по формуле:

$$G = E / (2(1 + \nu)), \quad (5)$$

где R — фактор снижения прочности (*Strength Reduction Factor*), принимаемый в случае сдвиговых деформаций равным 0,75.

Тогда:

$$G = 32\,500\,000 / (2(1 + 0,2)) = 13\,541\,670 \text{ кПа.}$$

$$G_i = 0,75 \cdot 13\,541\,670 = 10\,156\,250 \text{ кПа.}$$

$$E_{oed,i} = 2 \cdot 10\,156\,250 \cdot (1 - 0,45) / (1 - 0,9) = 1117\,190 \text{ кПа.}$$

$$K_n = 1117\,190 / 0,1 = 11171\,900 \text{ кН/м}^3.$$

По результатам расчета № 2 можно сделать вывод, что в случае необеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки (отсутствие болтовых связей и кольцевой

шпонки) деформирование конструкции происходит следующим образом:

- поднятие (всплытие) лотка на величину 45 мм и свода на величину 34 мм (рис. 5);
- деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) составляет 9 мм;
- смещение радиальных стыков друг относительно друга составило от 3 до 9 мм (рис. 6).

Во втором способе модуль жесткости можно определить как коэффициент, связывающий нормальное усилие в кольце с деформацией бетона:

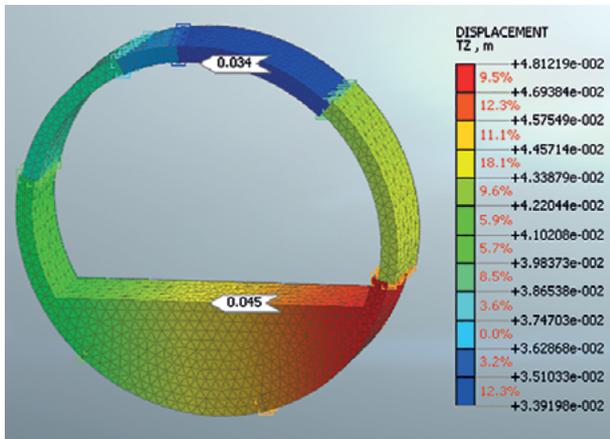


Рис. 5. Расчет № 2: изополю вертикальных деформаций обделки

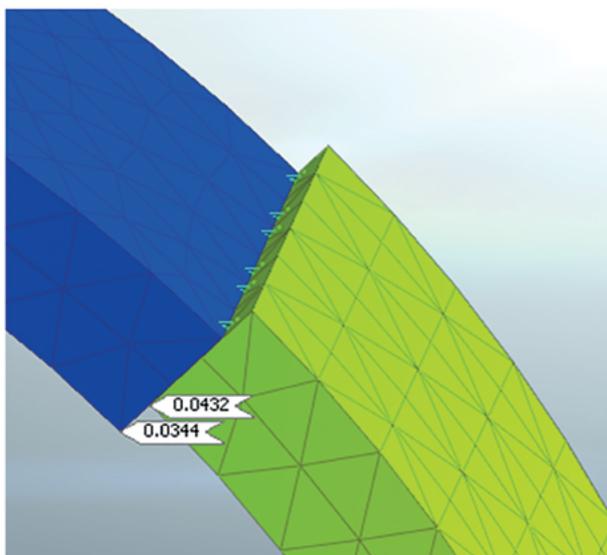


Рис. 6. Расчет № 2: смещение блоков в стыках (укрупненно)

$$K_n = N / (\Delta \cdot A), \quad (6)$$

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

В первом приближении значение нормальной силы может быть приблизительно оценено по формуле:

$$N = R \cdot q \cdot b, \quad (7)$$

где R — внешний радиус обделки, примем равным 5 м;

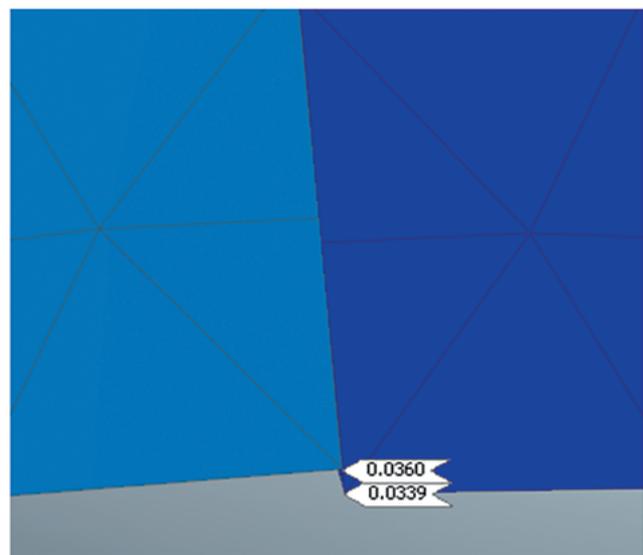
q — равномерно распределенная вертикальная нагрузка от горного давления, равная весу грунта над сводом тоннеля, кПа;

b — ширина кольца, м.

Тогда:

$$N = 5 \cdot 200 \cdot 1,8 = 1800 \text{ кН.}$$

В идеальном случае деформация бетона Δ является незначительной, поскольку напрямую зависит от модуля деформации бетона и в нашем случае оказывается равной микрометрам. В дей-



ствительности при деформировании обделки на контакте стыков может происходить локальное разрушение и истирание бетона. Приняв такое возможное разрушение равным 1 мм на каждый блок, можно определить нормальный модуль жесткости:

$$K_n = 1800 / (0,002 \cdot 1,8 \cdot 0,45) = 1111100 \text{ кН/м}^3.$$

В этом случае по результатам расчета № 3 можно сделать вывод, что в случае необеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки (отсутствие болтовых связей и кольцевой шпонки, а также возможность хрупкого раз-

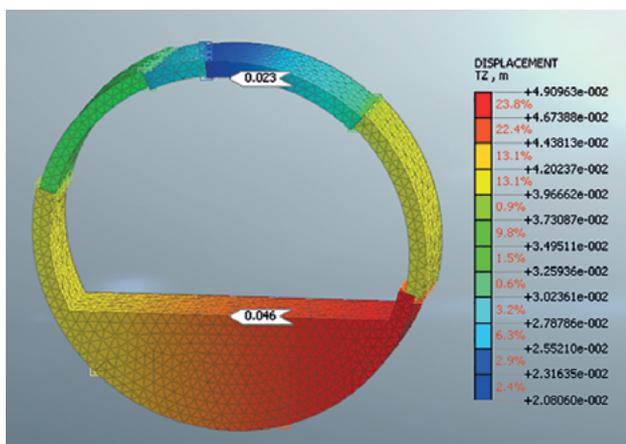
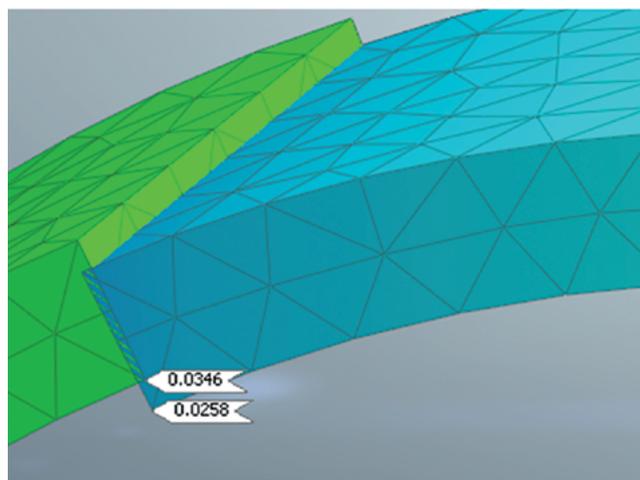


Рис. 7. Расчет № 3: изополю вертикальных деформаций обделки



рушения бетона на контакте) деформирование конструкции происходит следующим образом:

- поднятие (всплытие) лотка на величину 46 мм и свода на величину 23 мм (рис. 7);
- деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) в данной задаче составляет 23 мм;
- смещение радиальных стыков друг относительно друга составило от 6 до 10 мм (рис. 8).

2.2. Расчет обделки из блоков со стыками, допускающими раскрытие

В данной постановке моделировалась возможность раскрытия радиальных стыков обделки с помощью установки прокладки из сверхдеформативного материала между конечными элементами блоков (рис. 9). Сверхдеформативный материал имеет те же характеристики, что и конечные элементы блоков, за исключением модуля упругости, принятого равным 1000 кПа.

По результатам расчета № 4 можно сделать вывод, что в случае необеспечения работоспособности радиальных стыков в кольце обделки (возможность раскрытия стыков) деформирование конструкции происходит следующим образом:

- поднятие (всплытие) лотка на величину 52 мм и прогиб свода на величину 11 мм (рис. 10);

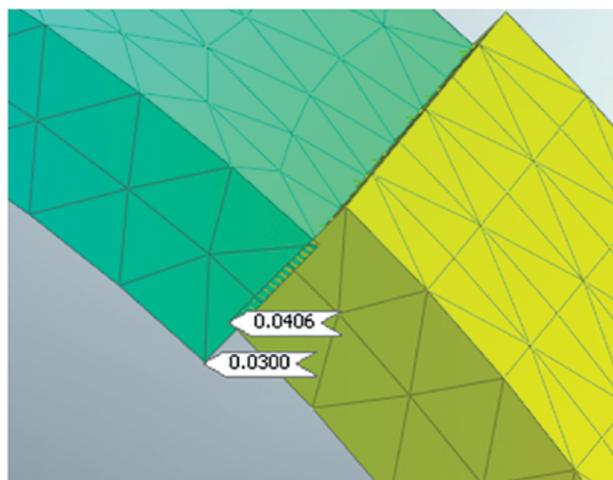


Рис. 8. Расчет № 3: смещение блоков в стыках (укрупненно)

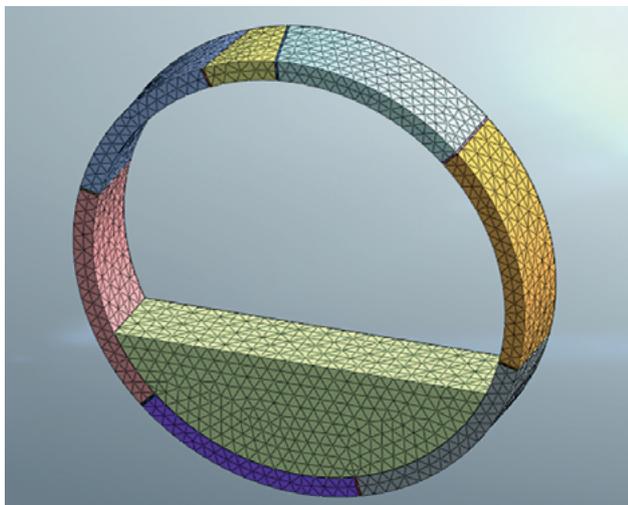


Рис. 9. Расчетная схема со сверхдеформативными прокладками в стыках

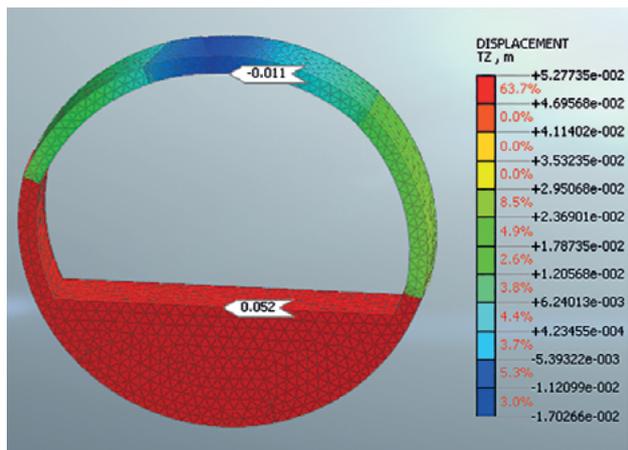


Рис. 10. Расчет № 4: изополя вертикальных деформаций обделки

– деформация свода относительно лотка (эллиптичность кольца) в данной задаче составляет 63 мм.

Анализ результатов

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Результаты математического моделирования

| Номер расчета | 1 | 2 | 3 | 4 | Предельные значения |
|--|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| Деформации свода, мм | +42 | +32 | +23 | -11 | |
| Деформации лотка, мм | +45 | +45 | +46 | +52 | |
| Эллиптичность, мм | 3 | 13 | 23 | 63 | 120 |
| Максимальные сжимающие напряжения, МПа | -4,53 | -5,26 | -3,69 | -4,78 | -22,0 |

В качестве прочностного критерия работоспособности тоннеля было принято расчетное сопротивление бетона класса В40 на сжатие в соответствии с СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

По результатам анализа максимальных сжимающих напряжений можно судить о значительном запасе по прочности тоннельной обделки (более чем в 3 раза).

В качестве деформационного критерия работоспособности тоннеля следует принимать такие деформации, после достижения которых нормативная эксплуатация тоннеля будет невозможной. Авторами был предложен следующий критерий: достижение эллиптичности, равной 120 мм, при эксплуатации, поскольку при таком значении плита перекрытия вентканала теоретически сможет приблизиться вплотную к габариту приближения строений. По результатам геодезических наблюдений, выполненных в период с 2018 по 2023 г. в рамках работ по эксплуатационному контролю перегонных тоннелей двухпутного участка Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена [9, 10], максимальная эллиптичность колец, зафиксированная в период эксплуатации, составляет 59 мм.

С точки зрения эксплуатации тоннельных сооружений данное значение указывает на существенный запас конструкции по деформациям. С точки зрения математического моделирования результаты геодезических измерений свидетельствуют о целесообразности моделирования стыков через прокладки сверхдеформативного материала, а не через интерфейсы.

Выводы

В результате исследования было выполнено математическое моделирование сборной обделки из высокоточных блоков.

1. Для рассмотрения случая исправной работы радиальных стыков было выполнено моделирование обделки монолитным кольцом эквивалентной жесткости. Максимальная эллиптичность кольца в этом случае составила 3 мм.

2. Для оценки влияния некачественной сборки колец было выполнено моделирование стыков обделки двумя способами: заданием интерфейсов и упругих прокладок между блоками.

3. По результатам анализа напряженно-деформированного состояния обделки можно судить о значительном запасе как по прочности, так и по деформациям.

4. Наиболее близкие значения к реально зафиксированным значениям эллиптичности оказались в случае моделирования стыков между блоками с помощью упругих прокладок.

Список источников

1. Константинов В. Д. Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра / В. Д. Константинов, А. Л. Новиков, А. А. Сокольников // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — Вып. 3. — С. 609–621. — DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621.

2. Ledyayev A. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo” / A. Ledyayev, V. Kavkazskiy, E. Davidenko // International scientific siberian transport forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. — Cham: Springer, 2022. — Vol. 402. — Pp. 28–37.

3. Vitali O. P. M. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil / O. P. M. Vitali, T. B. Celestino, A. Bobet // Underground Space. — 2022. — Vol. 7. — Iss. 1. — Pp. 1–18. — DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.

4. Shaposhnikov E. A. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms / E. A. Shaposhnikov, Yu. S. Frolov // Russian Journal of Transport Engineering. — 2023. — Vol. 10. —

Iss. 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. — DOI: 10.15862/05SATS123.

5. Mohyla M. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland / M. Mohyla, E. Hrubesova, B. Martin-kauppi, A. Mäkiranta et al. // Renewable Energy. — 2024. — Vol. 221. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.

6. Wei G. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation / G. Wei, F. Feng, C. Hu, J. Zhu 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.

7. Коньков А. Н. Анализ результатов математического моделирования тубинговых тоннельных обделок при использовании приведенных сечений / А. Н. Коньков, А. А. Сокольников // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. В 2 т. — Т. 1. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — С. 207–209.

8. Konkov A. The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections / A. Konkov, A. Sokornov, K. Korolev // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. — Cham: Springer, 2022. — Vol. 402. — Pp. 568–576. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_62.

9. Технические отчеты «Эксплуатационный контроль перегонных тоннелей двухпутного участка Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена». Этап 1–12 / ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра «Тоннели и метрополитены». — 2018–2021.

10. Технические отчеты «Эксплуатационный контроль перегонных тоннелей двухпутного участка Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена». Этап 1–6 / ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра «Тоннели и метрополитены». — 2022–2023.

Дата поступления: 21.05.2025

Решение о публикации: 10.07.2025

Контактная информация:

ЛЕДЯЕВ Александр Петрович — д-р техн. наук, проф.; ledyaev@pgupstm.ru

СОКОРНОВ Антон Александрович — ст. преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доц., anlonkov@pgupstm.ru

A Mathematical Model of a Large-Diameter Tunnel Block Lining

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

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

For citation: Ledyayev A. P., Sokornov A. A., Konkov A. N. A Mathematical Model of a Large-Diameter Tunnel Block Lining // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 605–615. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-605-615

Summary

Purpose: To evaluate the stress-strain state of a double-track interstation tunnel lining on the Nevsko-Vasileostrovskaya line of St. Petersburg Metro. **Methods:** Mathematical modelling by the finite element method and comparing the results with the field geodetic measurements. **Results:** A model has been created for a monolithic ring lining with the same rigidity. The lining with joints between the blocks has been modelled in two ways by using interfaces and elastic gaskets in the joints. The results of mathematical model and those of field geodetic measurements have been compared. Thus, the most rational model of the block lining joints has been determined. The stress-strain state has been evaluated in terms of safety and deformation margin. **Practical significance:** The results of the study can be used at the design stage of precast reinforced concrete lining structures for large-diameter tunnels, and at the stage of maintenance monitoring to predict changes in the lining stress-strain state.

Keywords: Tunnel, double-track lining, tunnel boring machine, mathematical modelling, finite element method.

References

1. Konstantinov V. D., Novikov A. L., Sokornov A. A. Vydavlivanie zamkovogo bloka pri stroitel'stve transportnykh tonneley bol'shogo diametra [Jacking of the lock block during construction of large-diameter transport tunnels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2024, vol. 21, Iss. 3, pp. 609–621. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621. (In Russian)
2. Ledyayev A., Kavkazskiy 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*. Cham: Springer Publ., 2022, vol. 402, pp. 28–37.
3. Vitali O. P. M., Celestino T. B., Bobet A. 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.
4. 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, Iss. 1. Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123.
5. Mohyla M., Hrubesova E., Martinkauppi B., Mäkiranta A. et al. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvi-lahti, Finland. *Renewable Energy*, 2024, vol. 221. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.
6. Wei G., Feng F., Hu C., Zhu J. 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: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010.
7. Kon'kov A. N., Sokornov A. A. Analiz rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya tyubingovykh tonnel'nykh obdelok pri ispol'zovanii privedennykh secheniy [Analysis of the results of mathematical modeling of tubing

tunnel linings using reduced sections]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [III Betancourt International Engineering Forum: proceedings]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 1, pp. 207–209. (In Russian)

8. 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*. Cham: Springer Publ., 2022, vol. 402, pp. 568–576. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_62.

9. *Tekhnicheskie otchety “Ekspluatatsionnyy kontrol’ peregonnykh tonney dvukhputnogo uchastka Nevsko-Vasileostrovskoy linii Peterburgskogo metropolitena”. Etap 1–12. FGBOU VO PGUPS, kafedra “Tonneli i metropoliteny”* [Technical reports “Operational inspection of main tunnels of the double-track section of the Nevsko-Vasileostrovskaya line of the St. Petersburg metro”. Stage 1–12. FSBEI HE PGUPS, Department of “Tunnels and Metros”]. 2018–2021. (In Russian)

10. *Tekhnicheskie otchety “Ekspluatatsionnyy kontrol’ peregonnykh tonney dvukhputnogo uchastka Nevsko-Vasileostrovskoy linii Peterburgskogo metropolitena”. Etap 1–6. FGBOU VO PGUPS, kafedra “Tonneli i metropoliteny”* [Technical reports “Operational inspection of main tunnels of the double-track section of the Nevsko-Vasileostrovskaya line of the St. Petersburg metro”. Stage 1–6. FSBEI HE PGUPS, Department of “Tunnels and Metros”]. 2022–2023. (In Russian)

Received: May 21, 2025

Accepted: July 10, 2025

Author’s information:

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

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

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

УДК 656.072

Применение рядов Фурье для прогнозирования объемов перевозок пассажиров в пригородном сообщении

С. С. Смирнов

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

Для цитирования: Смирнов С. С. Применение рядов Фурье для прогнозирования объемов перевозок пассажиров в пригородном сообщении // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 616–624. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-616-624

Аннотация

Цель: Для прогнозирования объемов перевозок пассажиров необходим учет неравномерности пассажиропотоков во времени, с чем связана сложность задачи прогнозирования. В данной статье предлагается решение данной задачи с помощью рядов Фурье. **Методы:** Статистические данные о количестве перевезенных пассажиров представлены в виде временного ряда с постоянным периодом. Каждому периоду временного ряда поставлена в соответствие неизвестная функция, значения которой совпадают со значениями временного ряда в исследуемый период. Приближенные значения неизвестных функций выражены частной суммой тригонометрических рядов Фурье. Определенные для каждой функции коэффициенты Фурье поставлены в зависимость от номера периода, после чего по наиболее подходящему тренду подобраны значения коэффициентов функции на прогнозный период. **Результаты:** В ходе исследования подобрана функция, описывающая поведение временного ряда на прогнозный период с высокой достоверностью аппроксимации. Коэффициент детерминации составил 0,94, а средняя абсолютная процентная ошибка — 3,5 %. **Практическая значимость:** Описанный метод прогнозирования может быть применен для определения количества перевезенных пассажиров в условиях сезонной неравномерности пассажиропотока и составления матриц корреспонденций на будущий период.

Ключевые слова: Ряд Фурье, пассажиропоток, матрица корреспонденций, неравномерность, сезонность, пригородные перевозки, прогнозирование.

Введение

Для расчета потребных размеров движения пригородных поездов на участке и составления расписаний с учетом сезонности перевозок требуется иметь прогнозные объемы перевозок. Сложность их прогнозирования заключается в значительной сезонной и пространственной неравномерности пассажиропотока [1, 2].

Сезонность пассажирских перевозок носит колебательный характер, а поэтому имеет смысл использовать методы обработки статистических данных из других областей науки. Метод рядов Фурье является одним из инструментов гармо-

нического анализа, с помощью которого обрабатывают сигналы в электротехнике, где требуется выполнять различные расчеты с неправильными формами кривых, описывающих реальные процессы [3].

Метод рядов Фурье применяется для прогнозирования чисел Вольфа, характеризующих солнечную активность, которая отличается непостоянной цикличностью [4, 5], что подтверждает возможность его применения для схожих сложных процессов. Метод применялся для создания модели прогнозирования временного распределения пассажиропотока на автомобильном транспорте [6].

В настоящей статье рассматриваются пассажиропотоки на основе данных, собранных ежемесячно, и предлагается способ прогнозирования объемов пассажирских перевозок в пригородном сообщении с помощью рядов Фурье на один год вперед.

Формулировка задачи

Задача исследования заключается в том, чтобы по имеющимся статистическим данным за предыдущие периоды подобрать функцию, описывающую поведение временного ряда в будущем.

Сведения о количестве перевезенных пассажиров в предыдущие периоды можно представить в виде последовательности:

$$a_1, a_2, \dots, a_n. \quad (1)$$

В условиях рассматриваемой задачи элементы a_i последовательности (1) измерены через равные промежутки времени Δt при начальном значении $t = 1$, приращении $\Delta t = 1$, $t_i = i$, где $i = 1, 2, \dots, n$, т. е. представленная последовательность является временным рядом [7].

Чтобы не противоречить определению понятия временного ряда, применены среднесуточные значения a , определенные как отношение исходной величины a к количеству дней в этом же месяце.

В табл. 1 представлены среднесуточные значения величины пассажиропотока из Санкт-Петербурга в один из городов-спутников ежемесячно за 6 лет.

Выборка данных в табл. 1 условно разделена на две: с января 2018 г. по декабрь 2022 г. — обучающую, а с января по декабрь 2023 г. — тестовую, чтобы по обучающей выборке подобрать функцию, описывающую поведение временного ряда в тестовый период и сравнить ее значения в этот период с фактическими значениями.

Математическое описание задачи

Задача прогнозирования временных рядов заключается в нахождении функции F :

$$y_{n+d} = F(y_1, y_2, \dots, y_n, d), \quad (2)$$

где $d = (1, 2, \dots, D)$ — отсрочка прогноза, здесь D — период прогнозирования.

Графически значения временного ряда описываются некоторой кривой $y = f(x)$, представленной на рис. 1.

По рис. 1 видно, что кривая имеет постоянный период в 12 измерений (1 год), что связано с сезонной неравномерностью пассажирских перевозок в пригородном сообщении.

Идея прогноза временных рядов методом рядов Фурье заключается в нахождении для каждого периода измерений значений коэффициентов Фурье и прогнозировании их значений по наиболее подходящему тренду, т. е. каждый период временного ряда раскладывается в тригонометрический ряд Фурье [8].

Фактически задача сводится к тому, чтобы найти приближенное выражение некоторой

Таблица 1. Среднесуточные значения пассажиропотока, пасс.

| Год | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь |
|------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|--------|---------|
| 2018 | 9083 | 10 324 | 9770 | 10 915 | 12 746 | 12 603 | 12 406 | 12 032 | 12 137 | 13 503 | 11 724 | 11 125 |
| 2019 | 10 099 | 11 999 | 11 680 | 13 362 | 14 182 | 15 344 | 14 376 | 13 980 | 14 937 | 15 021 | 13 725 | 13 460 |
| 2020 | 11 393 | 13 168 | 11 698 | 3707 | 4916 | 8864 | 10 517 | 11 943 | 14 166 | 13 276 | 10 948 | 10 509 |
| 2021 | 8970 | 11 553 | 12 448 | 13 845 | 13 378 | 15 586 | 14 064 | 13 215 | 14 733 | 14 309 | 12 547 | 13 554 |
| 2022 | 10 893 | 11 486 | 13 659 | 14 677 | 15 340 | 16 617 | 15 206 | 15 345 | 15 974 | 15 861 | 15 065 | 14 119 |
| 2023 | 12 534 | 13 968 | 14 972 | 15 695 | 17 074 | 18 030 | 16 718 | 16 714 | 17 720 | 17 188 | 16 755 | 15 749 |

функции $y = f(x)$, заданной таблицей ее значений на отрезке $[0; 2\pi]$ — полном периоде исходного временного ряда с шагом $h = 2\pi/n$:

$$y_i = f(x_i), i = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad (3)$$

где n — количество значений функции $y = f(x)$ [9, 10].

Приближенное значение функции выражается частной суммой тригонометрического ряда Фурье:

$$T_m(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx + b_k \sin kx). \quad (4)$$

В общем случае коэффициенты Фурье a_0, a_k, b_k определяются по формулам:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx, k = 0, 1, \dots, m, \quad (5)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx, k = 0, 1, \dots, m, \quad (6)$$

где m — количество гармоник, с помощью которых осуществляется приближение [9–11].

Подсчитанные для каждого ряда коэффициенты a_0, a_k, b_k сводятся в таблицы по периодам, после чего строятся графики из зависимости от периода с подбором линий тренда, по которым прогнозируются коэффициенты следующего периода [8, 12].

Прогнозные значения коэффициентов подставляются в выражение (4), которое и представляет собой прогнозную функцию $g(x)$. Точность полученных значений прогнозной функции $g(x)$ оценивается средней квадратичной ошибкой [9]:

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [f(x_i) - g(x_i)]^2 dx. \quad (7)$$

Решение задачи

Разложим в тригонометрический ряд Фурье последовательность значений из табл. 1 за 2018 год. Весь период измерений находится в отрезке $[0; 2\pi]$, а равноудаленные по времени значения пассажиропотока заданы $n = 12$ значениями с шагом $h = \pi/6$, что отражено в табл. 2.



Рис. 1. Графическое изображение значений временного ряда¹

¹ «Провал» значений в третьем периоде кривой связан с влиянием на пассажиропоток предпринятых административных мер в 2020 году, направленных на снижение подвижности населения.

Таблица 2. Значения функции $y = f(x)$, тыс. пасс.

| x_i | 0 | $\pi/6$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ | $2\pi/3$ | $5\pi/6$ | π | $7\pi/6$ | $4\pi/3$ | $3\pi/2$ | $5\pi/3$ | $11\pi/6$ |
|-------|------|---------|---------|---------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| y_i | 9,08 | 10,32 | 9,77 | 10,92 | 12,75 | 12,60 | 12,41 | 12,03 | 12,14 | 13,50 | 11,72 | 11,13 |

Так как функция $y = f(x)$ задана таблицей ее значений, приближенные значения коэффициентов Фурье можно получить по формулам:

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cos kx_i, \quad k = 0, 1, \dots, m, \quad (8)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \sin kx_i, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

Для примера: функция приближена с помощью двух гармоник, т. е. $m = 2$. Тогда значения коэффициентов, полученные из (8) и (9), составляют:

$$a_0 \approx 23,06, \quad a_1 \approx -1,30, \quad a_2 \approx -0,51, \\ b_1 \approx -0,64, \quad b_2 \approx -0,57.$$

Подставим значения полученных коэффициентов в выражение (4):

$$T_m(x) = 11,53 - 1,30 \cos x - 0,51 \sin x - \\ - 0,64 \cos 2x - 0,57 \sin 2x.$$

На рис. 2 сравниваются график полученной функции с графическим отображением исходного временного ряда.

Коэффициент детерминации (R^2), с помощью которого оценивается достоверность аппроксимации, в данном случае составляет 0,85, что говорит о хорошем качестве построенной модели. Но при проведении расчетов по большому количеству направлений было выявлено, что для минимизации отклонений от исходных рядов целесообразно выполнять приближение функции по пяти гармоникам ($m = 5$), так как коэффициент детерминации достигает значений, близких к единице, а накопленная квадратичная ошибка и средняя абсолютная процентная ошибка минимальны, что отражено в табл. 3.

На графике, представленном на рис. 3, наглядно видно хорошее качество приближения к исходному ряду даже по году с большими колебаниями значений пассажиропотока.

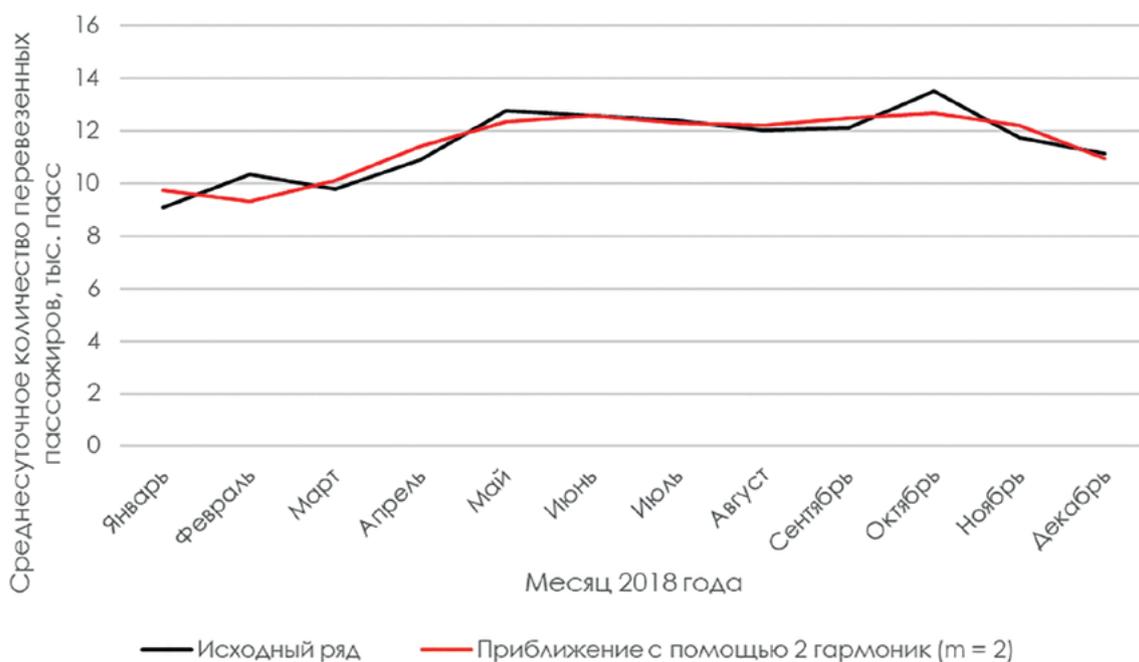


Рис. 2. Сравнение значений полученной функции с исходным рядом

Таблица 3. Показатели, характеризующие достоверность приближения¹

| | m | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------------------------|-------|-------|------|------|-------------|------|------|------|-------|-------|-------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 2018 г. | $\sum(T_i - y_i)^2$ | 6,46 | 2,95 | 2,02 | 1,82 | 1,37 | 1,37 | 2,98 | 3,18 | 4,05 | 7,56 | 20,14 |
| | R^2 | 0,66 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,93 | 0,94 | 0,89 | 0,89 | 0,86 | 0,85 | 0,97 |
| | $[\sum y_i - T_i /\sum y_i] 100$ | 1,84 | 1,24 | 1,03 | 0,98 | 0,85 | 0,85 | 1,25 | 1,29 | 1,45 | 1,99 | 3,24 |
| 2019 г. | $\sum(T_i - y_i)^2$ | 8,61 | 4,12 | 3,66 | 2,83 | 1,62 | 1,62 | 2,16 | 2,99 | 3,75 | 8,24 | 26,07 |
| | R^2 | 0,67 | 0,84 | 0,86 | 0,89 | 0,94 | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,91 | 0,88 | 0,99 |
| | $[\sum y_i - T_i /\sum y_i] 100$ | 1,81 | 1,25 | 1,18 | 1,04 | 0,78 | 0,78 | 0,91 | 1,07 | 1,19 | 1,77 | 3,15 |
| 2020 г. | $\sum(T_i - y_i)^2$ | 59,34 | 21,76 | 6,60 | 1,37 | 2,34 | 2,34 | 1,23 | 6,46 | 29,81 | 67,40 | 120,77 |
| | R^2 | 0,47 | 0,81 | 0,94 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,95 | 0,82 | 0,83 | 0,93 |
| | $[\sum y_i - T_i /\sum y_i] 100$ | 6,16 | 3,73 | 2,05 | 0,94 | 1,22 | 1,22 | 0,89 | 2,03 | 4,36 | 6,56 | 8,78 |
| 2021 г. | $\sum(T_i - y_i)^2$ | 15,62 | 10,69 | 9,93 | 5,07 | 3,24 | 3,24 | 3,94 | 8,80 | 10,12 | 15,04 | 31,61 |
| | R^2 | 0,51 | 0,67 | 0,69 | 0,84 | 0,90 | 0,92 | 0,93 | 0,90 | 0,89 | 0,90 | 1,00 |
| | $[\sum y_i - T_i /\sum y_i] 100$ | 2,50 | 2,07 | 1,99 | 1,42 | 1,14 | 1,14 | 1,25 | 1,87 | 2,01 | 2,45 | 3,55 |
| 2022 г. | $\sum(T_i - y_i)^2$ | 10,94 | 2,83 | 2,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 2,34 | 2,74 | 10,84 | 33,62 |
| | R^2 | 0,68 | 0,92 | 0,93 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,95 | 0,94 | 0,89 | 1,00 |
| | $[\sum y_i - T_i /\sum y_i] 100$ | 1,90 | 0,97 | 0,88 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,88 | 0,95 | 1,89 | 3,33 |

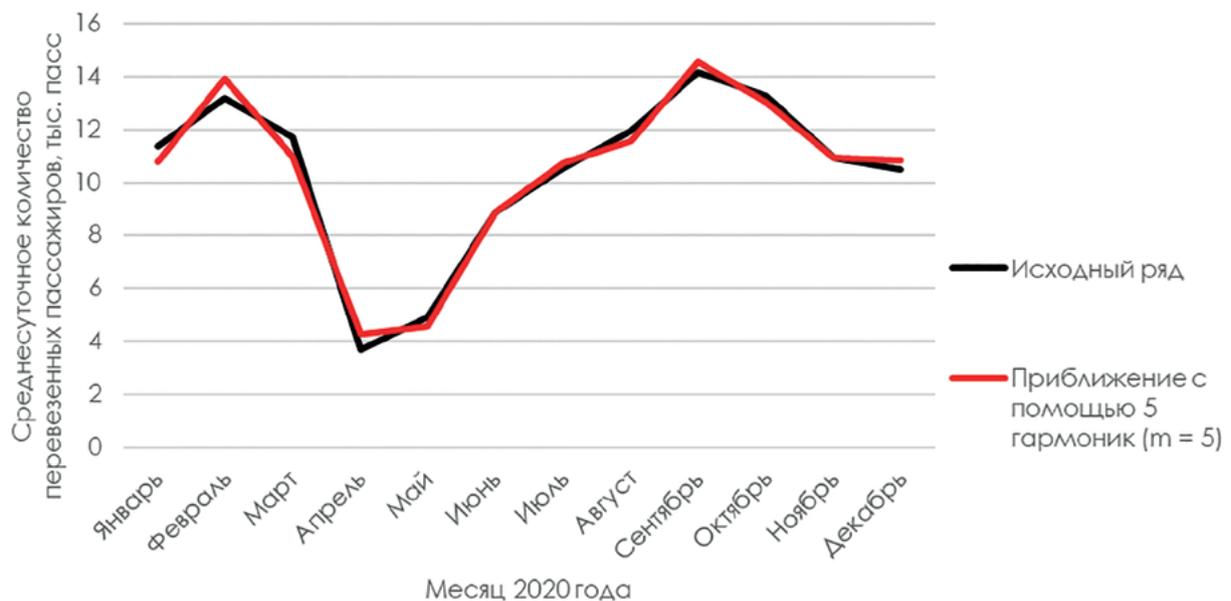


Рис. 3. Сравнение значений полученной функции с исходным рядом

¹ В таблице серой заливкой показаны приемлемые значения накопленной суммы квадратов отклонений (не более 3,50), коэффициентов детерминации (не менее 0,90) и средней абсолютной процентной ошибки (не более 1,20).

Таблица 4. Коэффициенты Фурье (по косинусам)

| Коэффициенты | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2018 | 23,06 | -1,30 | -0,51 | 0,01 | -0,05 | -0,38 |
| 2019 | 27,03 | -1,58 | -0,63 | -0,09 | -0,30 | -0,46 |
| 2020 | 20,85 | 0,86 | 1,05 | -0,45 | -0,70 | 0,03 |
| 2021 | 26,37 | -1,64 | -0,79 | -0,33 | -0,39 | -0,58 |
| 2022 | 29,04 | -1,85 | -0,95 | -0,29 | -0,36 | -0,02 |
| Прогноз на 2023 | 33,21 | -1,96 | -1,04 | -0,48 | -0,57 | -0,10 |

Таблица 5. Коэффициенты Фурье (по синусам)

| Коэффициенты | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | b_5 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2018 | -0,64 | -0,57 | 0,39 | 0,17 | -0,26 |
| 2019 | -0,69 | -0,59 | 0,26 | -0,22 | 0,12 |
| 2020 | -2,86 | 2,27 | 1,52 | -0,62 | -0,40 |
| 2021 | -0,26 | -0,45 | 0,14 | -0,81 | 0,16 |
| 2022 | -0,61 | -0,68 | -0,03 | -0,45 | -0,02 |
| Прогноз на 2023 | -0,62 | -0,70 | -0,11 | -0,09 | 0,08 |

Таблица 6. Сопоставление значений исходной функции с прогнозной

| Месяц | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| x_i | 0 | $\pi/6$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ | $2\pi/3$ | $5\pi/6$ | π | $7\pi/6$ | $4\pi/3$ | $3\pi/2$ | $5\pi/3$ | $11\pi/6$ |
| y_i | 12,53 | 13,97 | 14,97 | 15,70 | 17,07 | 18,03 | 16,72 | 16,71 | 17,72 | 17,19 | 16,76 | 15,75 |
| g_i | 12,54 | 13,59 | 15,83 | 16,57 | 17,92 | 18,31 | 17,45 | 17,79 | 17,93 | 17,59 | 17,97 | 15,79 |
| $(g_i - y_i)^2$ | 0,00 | 0,14 | 0,74 | 0,76 | 0,71 | 0,08 | 0,54 | 1,16 | 0,04 | 0,16 | 1,48 | 0,00 |
| $ g_i - y_i $ | 0,01 | 0,38 | 0,86 | 0,87 | 0,85 | 0,28 | 0,73 | 1,08 | 0,21 | 0,40 | 1,21 | 0,04 |
| $(g_i - y_i / y_i)100$ | 0,02 | 2,70 | 5,74 | 5,55 | 4,94 | 1,56 | 4,40 | 6,45 | 1,17 | 2,31 | 7,25 | 0,27 |

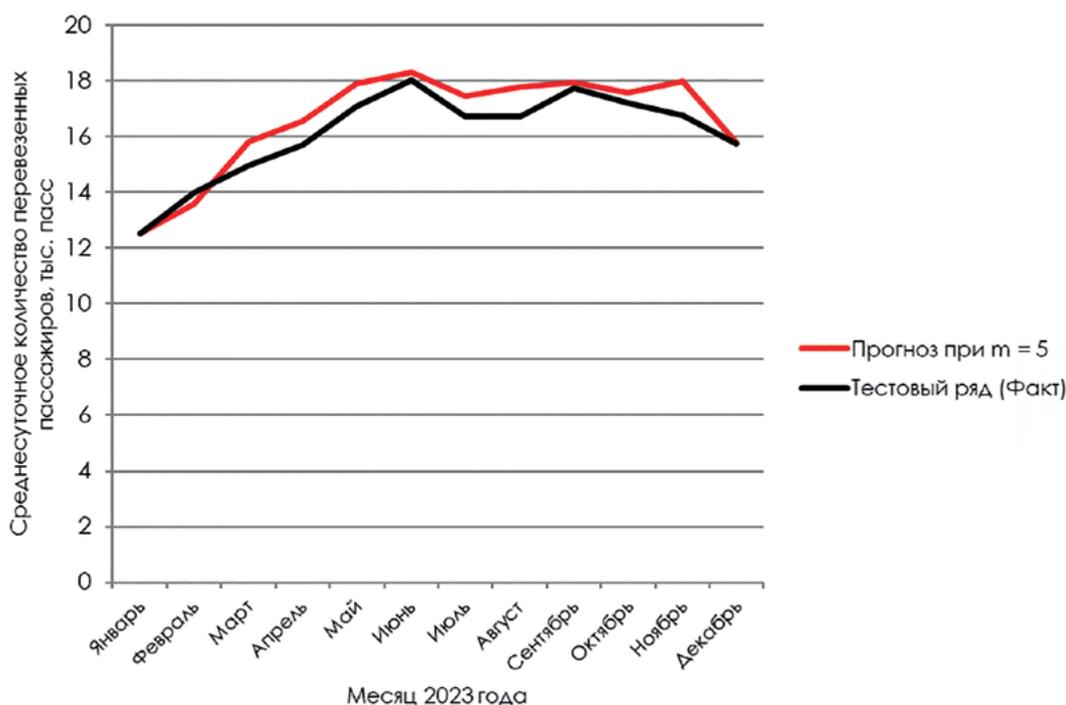


Рис. 4. Графическое сравнение кривых, описывающих прогнозный и исходный ряды

Значения коэффициентов Фурье, полученные из (8) и (9), сведены по периодам в табл. 4 и табл. 5 с прогнозом значений этих коэффициентов на период тестовой выборки —

на 2023 год. При этом прогнозные значения подобраны по наиболее подходящим линиям тренда для каждого коэффициента в отдельности.

По полученным коэффициентам, выполнив подстановку в выражение (3), получим прогнозную функцию $g(x)$:

$$g(x) = 16,61 - 1,96 \cos x - 0,62 \sin x - 1,04 \cos 2x - 0,7 \sin 2x - 0,48 \cos 3x - 0,11 \sin 3x - 0,57 \cos 4x - 0,09 \sin 4x - 0,1 \cos 5x + 0,08 \sin 5x. \quad (10)$$

В табл. 6 сведены значения функции (10) и исходного ряда, а на рис. 5 сопоставлены графики их значений.

Заключение

Коэффициент детерминации для прогнозной функции составил 0,94, т. е. модель хорошо объясняет поведение временного ряда в прогнозный период. Средняя квадратичная ошибка из (8) рассчитана как сумма квадратов отклонений, отнесенная к количеству измерений, и составила 0,48. Среднее абсолютное отклонение определено как сумма абсолютных отклонений, отнесенная к количеству измерений, и составило 0,58 тыс. пасс. Средняя абсолютная процентная ошибка составила 3,5 %, что подтверждает качество прогноза.

Полученная функция позволяет спрогнозировать количество перевезенных пассажиров с высокой точностью с учетом сезонной неравномерности. Метод может быть применен в дальнейшем для составления матриц корреспонденций на прогнозный период в один год, что позволит определить минимально необходимые размеры движения пригородных поездов и дополнительные, назначение которых требуется для покрытия сезонных колебаний пассажиропотока.

Список источников

1. Филиппов А. Г. Определение потребных размеров движения пригородных поездов с учетом суточной и внутрисуточной неравномерностей распределения пассажиропотока / А. Г. Филиппов, С. С. Смирнов, Д. В. Язев

и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 4. — С. 528–536. — DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-528-536.

2. Смирнов С. С. Применение корреляционного анализа при определении факторов влияния на месячные объемы перевозок в пригородном сообщении / С. С. Смирнов, В. В. Костенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2025. — Т. 22. — № 1. — С. 19–31. — DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-19-31.

3. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория / Д. Бриллинджер. — М.: Мир, 1980. — 536 с.

4. Гатин П. А. Исследование циклических временных рядов с переменной циклическостью методом рядов Фурье / П. А. Гатин, В. Н. Семенова // Вестник Димитровградского инженерно-технологического института. — 2018. — № 1(15). — С. 91–95.

5. Котляров О. Л. Нелинейная динамика и анализ временных рядов / О. Л. Котляров, А. Ю. Лоскутов // Проблемы анализа риска. — 2004. — Т. 1. — № 2. — С. 160–177.

6. Ие О. Н. Прогнозирование временного распределения пассажиропотока на автомобильном транспорте на основе методов гармонического анализа / О. Н. Ие // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2023. — № 2(58). — С. 23–30.

7. Кильдишев Г. С. Анализ временных рядов и прогнозирование / Г. С. Кильдишев, А. А. Френкель. — М.: Статистика, 1973. — 104 с.

8. Семенова В. Н. Приложение рядов Фурье к исследованию циклических временных рядов с небольшим периодом / В. Н. Семенова, П. А. Гатин // Вестник Димитровградского инженерно-технологического института. — 2017. — № 2(13). — С. 42–47.

9. Клепикова Л. С. Гармонический анализ: методические указания к лабораторной работе / Л. С. Клепикова, Л. А. Кухаренко. — Ленинград: ЛИИЖТ, 1987. — 16 с.

10. Мелентьев П. В. Приближенные вычисления / П. В. Мелентьев. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. — 390 с.

11. Колмогоров А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа: учеб. пособие / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. — М.: Физматлит, 2004. — 572 с.

12. Семенова В. Н. Об одном подходе к исследованию временных рядов с постоянной циклическостью / В. Н. Семенова, П. А. Гатин // Развитие и перспективы вузовской науки и образования в современных условиях: сборник научных статей итоговой научной конференции

профессорско-преподавательского состава. — Дмитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2017. — С. 48–51.

Дата поступления: 12.04.2025

Решение о публикации: 30.05.2025

Контактная информация:

СМИРНОВ Сергей Сергеевич — аспирант;
sss1999@inbox.ru

Predicting Suburban Passenger Traffic Flows Using the Fourier Series

S. S. Smirnov

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

For citation: Smirnov S. S. Predicting Suburban Passenger Traffic Flows Using the Fourier Series // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 616–624. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-616-624

Summary

Purpose: Predicting passenger traffic volumes is a complicated task because of the uneven passenger flows in time. This paper proposes a solution to this issue using the Fourier series. **Methods:** The statistics on the number of passengers transported are presented in a time series that has a fixed period. Each period of the time series is assigned an unknown function that matches the values of the time series in the period under study. The expression of approximate values of unknown functions is achieved by a partial sum of trigonometric Fourier series. The Fourier coefficients for each function are determined by the period number. The coefficients of the function for the forecast period are selected in accordance with the most appropriate trend. **Results:** The study involved selecting that explains the behavior of a time series during the forecast period with high approximation reliability. The deviation coefficient was 0.94 and the total deviation was 3.5%. **Practical significance:** The forecasting method described can be used to determine the transported passenger volumes, taking into account the seasonal unevenness of passenger traffic, and mobility plans can be created for the future.

Keywords: Fourier series, passenger traffic, mobility plan, unevenness, seasonality, suburban transportation, forecasting.

References

1. Filippov A. G., Smirnov S. S., Yazev D. V. et al. Opredelenie potrebnikh razmerov dvizheniya prigorodnykh poezdov s uchetom sutochnoy i vnutrisutochnoy neravnomernostey raspredeleniya passazhiropotoka [Determination of the required volumes of commuter train traffic taking into account daily and intraday unevenness in the distribution of

passenger traffic]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 4, pp. 528–536. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-528-536. (In Russian)

2. Smirnov S. S., Kostenko V. V. Primenenie korrelyatsionnogo analiza pri opredelenii faktorov vliyaniya na mesyachnye ob"emy perezovok v prigorodnom

soobshchenii [Application of correlation analysis in determining factors influencing monthly traffic volumes in commuter traffic]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2025, vol. 22, Iss. 1, pp. 19–31. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-19-31. (In Russian)

3. Brillindzher D. *Vremennye ryady. Obrabotka dannykh i teoriya* [Time Series. Data Processing and Theory]. Moscow: Mir Publ., 1980, 536 p. (In Russian)

4. Gatin P. A., Semenova V. N. Issledovanie tsiklicheskih vremennykh ryadov s peremennoy tsiklichnost'yu metodom ryadov Fur'e [Study of Cyclical Time Series with Variable Cyclicity by the Fourier Series Method]. *Vestnik Dimitrovgradskogo inzhenerno-tekhnologicheskogo instituta* [Bulletin of the Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute]. 2018, Iss. 1(15), pp. 91–95. (In Russian)

5. Kotlyarov O. L., Loskutov A. Yu. Nelineynaya dinamika i analiz vremennykh ryadov [Nonlinear Dynamics and Analysis of Time Series]. *Problemy analiza riska* [Problems of Risk Analysis]. 2004, vol. 1, Iss. 2, pp. 160–177. (In Russian)

6. Ie O. N. Prognozirovaniye vremennogo raspredeleniya passazhiropotoka na avtomobil'nom transporte na osnove metodov garmonicheskogo analiza [Forecasting the temporal distribution of passenger traffic in road transport based on harmonic analysis methods]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University]. 2023, Iss. 2(58), pp. 23–30. (In Russian)

7. Kil'dishev G. S., Frenkel' A. A. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye* [Time series analysis and forecasting]. Moscow: Statistika Publ., 1973, 104 p. (In Russian)

8. Semenova V. N., Gatin P. A. Prilozhenie ryadov Fur'e k issledovaniyu tsiklicheskih vremennykh ryadov s nebol'shim periodom [Application of Fourier series to the

study of cyclic time series with a small period]. *Vestnik Dimitrovgradskogo inzhenerno-tekhnologicheskogo instituta* [Bulletin of the Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute]. 2017, Iss. 2(13), pp. 42–47. (In Russian)

9. Klepikova L. S., Kukhareenko L. A. *Garmonicheskiy analiz: metodicheskie ukazaniya k laboratornoy rabote* [Harmonic Analysis: Guidelines for Laboratory Work]. Leningrad: LIIZhT Publ., 1987, 16 p. (In Russian)

10. Melent'ev P. V. *Priblizhennyye vychisleniya* [Approximate Calculations]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1962, 390 p. (In Russian)

11. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza: ucheb. posobie* [Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis: Textbook]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2004, 572 p. (In Russian)

12. Semenova V. N., Gatin P. A. Ob odnom podkhode k issledovaniyu vremennykh ryadov s postoyannoy tsiklichnost'yu [On one approach to the study of time series with constant cyclicity]. *Razvitie i perspektivy vuzovskoy nauki i obrazovaniya v sovremennykh usloviyakh: sbornik nauchnykh statey itogovoy nauchnoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava* [Development and prospects of university science and education in modern conditions: a collection of scientific articles from the final scientific conference of the faculty]. Dimitrovgrad: DITI NIYaU MIFI Publ., 2017, pp. 48–51. (In Russian)

Received: April 12, 2025

Accepted: May 30, 2025

Author's information:

Sergey S. SMIRNOV — Postgraduate Student;
sss1999@inbox.ru

УДК 625.032.3

Математическое моделирование внешних сил в режимах тяги и торможения, действующих на тяговый агрегат

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

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

Для цитирования: Риполь–Сарагоси Т. Л., Риполь–Сарагоси Л. Ф., Яицков И. А. Математическое моделирование внешних сил в режимах тяги и торможения, действующих на тяговый агрегат // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 625–630. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-625-630

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы моделирования управления силой тяги при различных режимах для тягового агрегата ПЭ-2М, а также различных режимов торможения с целью недопущения аварий и крушений тягового подвижного состава. **Цель:** Продолжение анализа предпосылок для создания математической модели, позволяющей определить условия обеспечения безопасности перевозочного процесса в части недопущения разрыва автосцепок груженных тяговых агрегатов, думпкаров, а также возможного эффекта «набегания» (выдавливания вагонов), описанных в [1]. **Методика:** В настоящей статье предлагается рассмотреть моделирование воздействия внешних сил на тяговый агрегат и моторные думпкары. **Методы:** При решении этих задач предлагается смоделировать и описать воздействие сил тяги и сил торможения, возникающих при различных режимах ведения тягового агрегата. **Практическая значимость:** Обоснована необходимость расчета возникающих сил при управлении груженными тяговыми агрегатами с целью недопущения крушений.

Ключевые слова: Силы тяги, силы торможения, аппроксимирование, колодка, реостатное торможение.

1. Силы тяги

В отличие от алгоритмов, предложенных в [2], с целью более точного описания процесса изменения силы тяги при переходных и установившихся режимах движения в работе моделируются тяговые характеристики подвижных единиц управления (электровоза и моторных думпкаров), которые на каждой позиции контроллера могут быть с достаточной точностью аппроксимированы аналитическими функциями вида [3, 4] (рисунки):

$$F_i^{(z)}(V_{2i}) = \sum_{k=0}^2 a_{kz} V_{2i}^k / \sum_{k=0}^2 b_{kz} V_{2i}^k, \quad (1)$$

где a_{kz}, b_{kz} — коэффициенты полинома числителя и знаменателя, соответствующего z -ой позиции контроллера.

Низшие позиции рукоятки контроллера (2, 3, 4) легко аппроксимируются функцией вида: $F_i^{(z)}(V_{2i}) = a_z / (b_z + c_z V_{2i})$, а первая позиция — линейной зависимостью: $F_i^{(1)}(V_{2i}) = a_1 - b_1 V_{2i}$.

Алгоритм управления тягой состоит в описании переключения контроллера, в интервале позиций $[Z_{\min i}, Z_{\max i}]$ с какой-либо скоростью изменения позиций $V_{KTi} > 0$ (при наборе позиций) и $V_{KTi} < 0$ (при сбросе позиций). В первом приближении функцию изменения позиций контроллера принимаем линейной. Скорость набора позиций может меняться в процессе переключе-

чения позиций. Таким способом удается максимально приблизить процесс изменения силы тяги в модели к реальному.

Функция нарастания позиций контроллера записывается в виде:

$V_{KTi} > 0$ (набор позиций)

$$Z_i = \begin{cases} Z_{\min i}; & t \leq t_{KTi}; \\ Z_{\min i} + V_{KTi}(t - t_{KTi}); & t > t_{KTi}; \\ Z_{\max i}; & Z_i \geq Z_{\max i}. \end{cases}$$

$V_{KTi} < 0$; (сброс позиций) (2)

$$Z_i = \begin{cases} Z_{\min i}; & t \leq t_{KTi}; \\ Z_{\min i} + V_{KTi}(t - t_{KTi}); & t > t_{KTi}; \\ Z_{\max i}; & Z_i \leq Z_{\min i}, \end{cases}$$

где t_{KTi} — время начала переключения позиций контроллера.

Ограничение силы тяги по сцеплению учитывается в процессе движения [5–7] в виде:

$$F_{\text{СЦ}i}^{\max} = G_i \left(0,01 + \frac{54}{250 + 75,6V_i} \right) \times \begin{cases} \frac{250 + 1,5R_i}{500 + 1,1R_i}; & R_i \leq 500 \text{ м}; \\ 1; & R_i > 500 \text{ м}. \end{cases} \quad (3)$$

2. Тормозные силы

Полная тормозная сила подвижной единицы карьерного поезда определяется по формуле:

$$B_i = K_i' \cdot \psi_{Ki}' \cdot m_i' + K_i'' \cdot \psi_{Ki}'' \cdot m_i'' + B'_{\text{ЭМРТ}i} \cdot m_i''' + B_{Pi}, \quad (4)$$

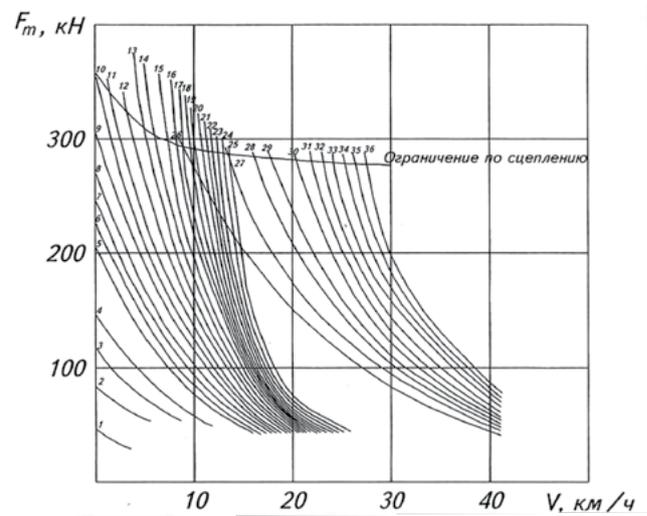
где K_i', K_i'' — силы нажатия тормозных колодок для крайних и средних осей тележки;

ψ_i', ψ_i'' — коэффициенты трения колодок о бандаж для крайних средних осей тележки;

m_i', m_i'' — число колодок на крайних и средних осях экипажа;

$B'_{\text{ЭМРТ}i}, m_i'''$ — тормозная сила одного башмака ЭМРТ и число башмаков на одном экипаже;

B_{Pi} — тормозная сила реостатного тормоза.



Тяговые характеристики тягового агрегата ПЭ-2М

Действительные коэффициенты трения колодок о бандаж рассчитывают по формулам:

– для чугунных стандартных колодок:

$$\psi_{Ki} = \frac{127,4 \cdot K_i + 7800}{(8,15 \cdot K_i + 100) \cdot (11,45 \cdot V_{2i} + 100)};$$

– для композиционных колодок:

$$\psi_{Ki} = \frac{30,75 \cdot K_i + 6030}{(2,04 \cdot K_i + 100) \cdot (5,06 \cdot V_{2i} + 100)}.$$

Здесь V_{2i} — измеряется в м/с, K_i — в кН.

Сила нажатия тормозных колодок на бандаж может быть вычислена [8, 9] по формуле:

$$K_i = A_i P_{\text{Ц}i},$$

где A_i — передаточный коэффициент рычажной передачи тормоза;

$P_{\text{Ц}i}$ — давление в тормозном цилиндре подвижной единицы.

Процесс наполнения и выпуска воздуха из тормозных цилиндров может быть описан следующим образом:

– при наполнении:

$$P_{\text{Ц}i} = \begin{cases} P'_{\min i}; & t \leq t_{Ti}; \\ P'_{\max i} (t - t_{Ti}) / \tau_i'; & t_{Ti} < t \leq \tau_i' + t_{Ti}; \\ P'_{\max i}; & t > \tau_i' + t_{Ti}. \end{cases} \quad (5)$$

– при отпуске тормозов:

$$P_{Цi} = \begin{cases} P''_{\max i}; & t \leq t_{O_i}; \\ P''_{\max i} (t_{O_i} + \tau''_i - t) / \tau''_i, & t_{O_i} < t \leq \tau''_i + t_{O_i}; \\ P''_{\min i}; & t > \tau''_i + t_{O_i}, \end{cases} \quad (6)$$

где $P'_{\min i}, P''_{\min i}$ — давление в тормозном цилиндре до начала торможения и после отпуска;
 $P'_{\max i}, P''_{\max i}$ — давление в тормозном цилиндре после торможения и перед отпуском;
 t_{Ti}, t_{O_i} — время начала торможения и отпуска i -го вагона;
 τ'_i, τ''_i — время наполнения тормозного цилиндра с давления $P'_{\min i}$ до давления $P'_{\max i}$ и время разрядки тормозного цилиндра на величину $(P''_{\max i} - P''_{\min i})$.

Введение в алгоритм величин $P'_{\min i}, P''_{\min i}$, которые в общем случае могут быть неравными нулю, позволяет моделировать процессы ступенчатого торможения и отпуска тормозов поезда.

Так как карьерный поезд является короткооставным, то не представляет труда для каждого режима торможения или отпуска задать в качестве исходных данных величины для каждой подвижной единицы:

$$P'_{\min i}, P''_{\min i}, P'_{\max i}, P''_{\max i}, t_{Ti}, t_{O_i}, \tau'_i, \tau''_i; i = \overline{1, N}.$$

Числовые значения этих величин определены из анализа реальных диаграмм наполнения и разрядки тормозных цилиндров на модели тормозной сети карьерного поезда, смонтированной на тормозной станции РГУПС. Это позволило получить довольно высокую сходимость результатов расчета с экспериментальными данными. Предложенный метод определения констант, входящих в уравнения (5) и (6), позволяет учесть некоторые нетипичные особенности тормозной системы (например, неисправности и плохую работу тормозных приборов в конкретном опыте).

Тяговые агрегаты ПЭ2М оборудованы электромагнитным рельсовым тормозом (ЭМРТ). Приемлемым является введение в расчет фор-

мулы для действительной тормозной силы ЭМРТ, полученной в натурных испытаниях подвижного состава:

$$B'_{ЭМРТi} = 18,934 \cdot \exp(-0,05472 \cdot V_{2i}), \text{ кН.}$$

Одним из основных тормозных режимов при эксплуатации карьерных поездов, наряду с пневматическим торможением, является торможение реостатное. Алгоритм вычисления тормозной силы при реостатном торможении аналогичен алгоритму вычисления силы тяги. Тормозные характеристики тягового агрегата ПЭ2М аппроксимированы полиномами 5-й степени на каждой тормозной позиции контроллера:

$$B_{Pi}^{(Z)} = \sum_{k=0}^5 C_{iZ} \cdot V_{2i}^k.$$

Функция позиционного регулирования тормозной силы тягового агрегата реализуется уравнениями (2).

На тормозную силу реостатного тормоза наложены следующие ограничения:

1. Ограничение по наибольшей скорости:

$$V_{2i} \leq 18 \text{ м/с.}$$

2. Ограничение по наибольшему напряжению на тяговых двигателях:

$$B_{Hi}^{\max} = b_1 + b_2 \cdot V_{2i} + b_3 \cdot V_{2i}^2.$$

3. Ограничение по сцеплению, аналогичное ограничениям для силы тяги.

Таким образом, тормозная сила реостатного тормоза i -ой подвижной единицы может быть вычислена следующим образом [10]:

$$B_{Pi}^{(Z)} = \begin{cases} B_{Pi}^{(Z)}(V_{2i}, Z_i); & B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{Hi}^{\max}; & B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{ЦЦi}^{\max}; \\ B_{Hi}^{\max}; & B_{Pi}^{(Z)} > B_{Hi}^{\max}; & B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{ЦЦi}^{\max}; \\ B_{ЦЦi}^{\max}; & B_{Pi}^{(Z)} \leq B_{Hi}^{\max}; & B_{Pi}^{(Z)} > B_{ЦЦi}^{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Выводы

1. Актуальность предлагаемой темы научного исследования представляет интерес и является востребованной.

2. Предполагаемые результаты, полученные путем математического моделирования, дадут возможность значительно повысить безопасность движения подвижного состава.

3. Предложены методы расчета сил тяги и сил торможения при различных режимах ведения тягового агрегата.

4. Аппроксимированы аналитическими функциями тяговые характеристики подвижных единиц управления (электровоза и моторных думпкаров).

5. Предложены методы моделирования процессов режимов торможения и отпуска.

6. Определен и обоснован предпочтительный режим торможения исходя из условий ограничения и эксплуатации.

Список источников

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

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

3. Патент RU 2361761 Российская Федерация. Электромагнитный рельсовый тормоз: заявл. 07.02.2008; опубл. 20.07.2009 / Л. В. Балон, В. А. Соломин, Л. Ф. Риполь-Сарагоси. МПК В61Н7/08.

4. Савушкин Р. А. Автосцепка СА-3Т для вагонов тяжеловесного движения: особенности конструкции и

технологии изготовления / Р. А. Савушкин, А. М. Орлова, Р. А. Кудрявцев, С. А. Пономарев и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2018. — № 1(53). — С. 30–32.

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

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

7. Кравчук В. В. Повышение безопасности движения поездов повышенной массы и длины / В. В. Кравчук, И. И. Доронина, Е. А. Харин. — Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщений, 2005.

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

9. Потапов М. Г. Карьерный транспорт. — М.: Недра, 1985.

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

Дата поступления: 09.06.2025

Решение о публикации: 07.07.2025

Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф. кафедры «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте»;

ripol-saragosi@mail.ru

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

ЯИЦКОВ Иван Анатольевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; yia@rgups.ru

A Mathematical Model of External Forces Acting on the Train Traction System in Both Traction and Brake Modes

T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi, I. A. Yaitskov

Rostov State Transport University, 2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Ripol-Saragosi T. L., Ripol-Saragosi L. F., Yaitskov I. A. A Mathematical Model of External Forces Acting on the Train Traction System in Both Traction and Brake Modes // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 625–630. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-625-630

Summary

The paper touches upon the issues of modelling the traction force control of the “PE-2M” industrial electric locomotive in various brake modes to ensure freight train safety and to avoid train accidents. **Purpose:** To analyse the prerequisites for creating a mathematical model determining the conditions for ensuring the safety of the transportation process in terms of preventing the uncoupling of automatically coupled traction units and dump cars and avoiding the car “crowding” (a car being squeezed out) described in [1]. **Methodology:** A mathematical model was proposed that describes the external forces have an impact on the traction units and motor dump cars. **Methods:** It is proposed to simulate and describe how traction and braking forces work in different motion modes. **Practical significance:** Calculating the arising forces when operating heavy-duty traction units is a valid method for preventing crashes.

Keywords: Traction force, brake force, approximation, brake shoe, rheostatic braking.

References

1. Ripol'-Saragosi L. F., Ripol'-Saragosi T. L., Yaitskov I. A. Analiz predposylok sozdaniya matematicheskoy modeli funktsionirovaniya avtoscepok gruzhenykh tyagovykh agregatov [Analysis of prerequisites for creating a mathematical model of the operation of couplers of loaded traction units]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908. (In Russian)
2. Ripol'-Saragosi T. L., Ripol'-Saragosi L. F. Issledovanie vliyaniya temperaturnogo rezhima katushki na vremya vklyucheniya elektromagnitnogo rel'sovogo tormoza (EMRT) [Research on the influence of the coil temperature regime on the switching time of the electromagnetic rail brake (EMRB)]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov Transport University]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2022, Iss. 3(87), pp. 35–43. (In Russian)
3. Balon L. V., Solomin V. A., Ripol'-Saragosi L. F. *Elektromagnitnyy rel'sovyy tormoz* [Electromagnetic rail brake]. Patent RF, no. 2361761, 2009. (In Russian)
4. Savushkin R. A., Orlova A. M., Kudryavtsev R. A., Ponomarev S. A. et al. Avtosyepka SA-3T dlya vagonov tyazhelovesnogo dvizheniya: osobennosti konstruktssii i tekhnologii izgotovleniya [SA-3T coupler for heavy-load cars: design features and manufacturing technology]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Cars and car service]. 2018, Iss. 1(53), pp. 30–32. (In Russian)
5. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty promyshlennykh elektrovozov i tyagovykh agregatov peremennogo toka* [Rules for traction calculations for train operations of industrial electric locomotives and alternating

current traction units]. Moscow: PromtransNIIproekt Publ., 1977, Iss. 4323. (In Russian)

6. *Pravila tyagovykh raschetov dlya teplovozov na promyshlennom transporte* [Rules for traction calculations for diesel locomotives in industrial transport]. Moscow: PromtransNIIproekt Publ., 1977, Iss. 4324. (In Russian)

7. Kravchuk V. V., Doronina I. I., Kharin E. A. *Povyshenie bezopasnosti dvizheniya poezdov povyshennoy massy i dliny* [Improving the safety of movement of trains of increased weight and length]. Khabarovsk: Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniy Publ., 2005. (In Russian)

8. Grebenyuk P. T. *Soprotivlenie dvizheniyu podvizhnogo sostava v S-obraznykh krivykh* [Resistance to movement of rolling stock in S-shaped curves]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1987, Iss. 1. (In Russian)

9. Potapov M. G. *Kar'ernyy transport* [Kar'ernyy transport]. Moscow: Nedra Publ., 1985. (In Russian)

10. 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 long-distance trains on the danger of wagon transportation depending on their loading]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2013, Iss. 3(46), pp. 64–68. (In Russian)

Received: June 09, 2025

Accepted: July 07, 2025

Author's information:

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department “Heat Engineering at Railway Transport”; ripol-saragosi@mail.ru

Leonid F. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Cars and Car Maintenance”; el.siete.07@mail.ru

Ivan A. YAITSKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department “Cars and Car Maintenance”; yia@rgups.ru

УДК 551.343.74

Анализ эффективности применения инновационного специального контактного провода с антиобледенительным покрытием

В. А. Бараусов¹, В. П. Бубнов², В. И. Моисеев²

¹ООО «ГК ИМСАТ», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, ул. Гражданская, 7, лит. А

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

Для цитирования: Бараусов В. А., Бубнов В. П., Моисеев В. И. Анализ эффективности применения инновационного специального контактного провода с антиобледенительным покрытием // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 631–642. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-631-642

Аннотация

Цель: Определение эффективности применения специального контактного провода (СКП), обеспечивающего эксплуатацию подвижного состава в условиях капельного обледенения, наиболее интенсивного при температурах воздуха от 0 до -5 °С в условиях «мокрого снегопада» и ветра. **Принцип инновационного предложения.** Провод имеет специально выполненный рельеф верхней своей части, выполненный в заводских условиях накаткой и тонкое теплоизолирующее антиобледенительное покрытие с гидрофобными свойствами, сохраняющее форму рельефа. Рельеф и гидрофобные свойства СКП замедляют отвод выделяющейся теплоты кристаллизации осаждающихся на провод капель воды, ведущих к образованию на нем слоя льда, который быстро превращается в мощное ледоотложение, имеющее форму гололедно-снеговой «муфты». Атмосферная вода, оседающая на головку провода, накапливается на ней в виде крупных капель, которые срываются вниз еще до своего замерзания. Основная ее масса сбрасывается с СКП вниз до своего замерзания, а небольшая ее часть замерзает на нижней части провода, меняя форму ледоотложения. Вместо крупной и твердой гололедно-снеговой муфты, охватывающей провод со всех сторон, на проводе образуются «сосульки», имеющие малую площадь контакта с проводом. Они сравнительно легко удаляются механическими или тепловыми способами, а при сильных ветровых нагрузках, раскачивающих провода, отваливаются сами. **Результаты:** Проведен критический анализ способов борьбы с обледенением СКП с точки зрения эффективности; выполнен финансовый расчет первоначальных затрат, эксплуатационных расходов, экономического эффекта и срока окупаемости. Приводится пример расчета эффективности применения инновационного подхода по использованию СКП, который включает: создание при помощи накатки рельефной поверхности верхней части провода в районе его головки и канавки, нанесение тонкого двухслойного покрытия, сохраняющего рельеф поверхности. Первый, внутренний, слой покрытия является тепловой изоляцией, второй, наружный, обеспечивает несмачиваемость (гидрофобность) поверхности провода. Делается вывод об эффективности применения инновационного СКП, препятствующего отводу теплоты фазового превращения воды в лед вовнутрь провода, разрушающего пленку воды на поверхности провода с образованием крупных поверхностных капель, скатывающихся вниз до своего замерзания.

Ключевые слова: Контактный провод, обледенение, теплопередача, фазовый переход, рельефная поверхность, гидрофобное покрытие, гидродинамика капель, турбулентность, имитационное моделирование, метод конечных разностей.

Введение

Обледенение контактных проводов и воздушных линий электропередачи (ЛЭП) представляет серьезную проблему для электротранспортных сетей в зимний период. На проводах контактной сети и ЛЭП могут образовываться мощные отложения льда в виде прочной и тяжелой «гололедно-снеговой муфты», охватывающей провод со всех сторон [1, 2]. Муфты, имеющие толщину стенки свыше 20 см и массу в десятки килограмм, резко увеличивают и вес провода, и ветровую нагрузку, действующую на него. При их суммарном воздействии нередки случаи обрыва проводов и обрушения опор ЛЭП [3].

Таблица 1. Ориентировочные потери от обледенения

| Страна/регион | Протяженность электрифицированных путей (тыс. км) | Ориентировочные потери от обледенения (млн долларов США в год) |
|-----------------|---|--|
| США | ~1 (Amtrak, Северо-Восточный коридор) | 10–50 |
| Северная Европа | ~25 (Швеция, Норвегия, Финляндия) | 22–55 (20–50 млн евро, пересчет по курсу ~1,1 USD/EUR) |
| Китай | ~159 (из них 45 — высокоскоростные) | 100–1000 |
| Россия | ~54 | 20–50 |

Примечания:

США: указана протяженность только основных электрифицированных линий Amtrak, так как грузовая сеть почти не электрифицирована. Потери различаются в зависимости от суровости зимы.

Северная Европа: суммарная протяженность Швеции (~15 тыс. км), Финляндии (~5,5 тыс. км) и Норвегии (~4,5 тыс. км). Потери распределены между различными вариантами оптимизации инфраструктуры.

Китай: огромная сеть включает высокоскоростные и обычные линии. Сюда входят как прямые последствия, так и затраты на профилактику.

Россия: протяженность электрифицированных путей, по данным РЖД. Потери зависят от погодных условий в регионах.

Эти аварийные ситуации сопровождаются большими экономическими потерями — восстановление линий после обледенения занимает в десятки раз больше времени, чем устранение обычных аварий [4]. В табл. 1 представлены данные о протяженности электрифицированных железнодорожных путей и ориентировочных финансовых потерях от обледенения контактных проводов в долларах США [5–7]. Протяженность указана на основе последних имеющихся данных (в основном за 2023 год). А обозначенные потери — это оценка, полученная на основе анализа, так как точные цифры за 2024–2025 годы пока не опубликованы.

Таким образом, железные дороги Северной Европы и России остро нуждаются в эффективных мерах борьбы с обледенением контактного провода. Патент RU 2827574 [8] предлагает инновационное решение этой проблемы — специальный контактный провод (СКП) с теплоизолирующим и гидрофобным защитным покрытием, наносимым на верхнюю поверхность провода, имеющую специфический рельеф, созданный накаткой. Суть метода заключается в том, что оседающая вода долго сохраняется в жидком виде на верхней части провода в виде постоянно подпитываемых извне «поверхностных капель», которые по мере увеличения своей массы сбрасываются с провода вниз еще до полного своего замерзания. Благодаря такому подходу решение по патенту позволяет предотвращать образование гололедно-снеговых муфт, а не только удалять их постфактум с большими затратами труда и тепловой энергии.

По оценкам специалистов, эффективность такого подхода существенно превосходит возможности традиционных методов, при этом отсутствует потребность в громоздком оборудовании или больших энергозатратах. Ниже проводится сравнительный анализ данного запатен-

тованного решения и традиционных способов защиты контактных проводов от обледенения.

Сравнение вариантов защиты от обледенения

Традиционные методы борьбы с обледенением [3, 4, 9]

Электротермический нагрев проводов. Широко применяется метод плавки льда с помощью пропускания повышенного тока через провод. Нагрев позволяет растопить наледь, восстанавливая проводимость. Этот способ эффективен, но требует отключения линии от потребителей на время работ и значительных энергозатрат. В зависимости от толщины льда и сечения провода процесс может занимать до 100 минут на участок. Кроме того, требуется установка специального оборудования (например, высокоомощных источников тока), что сопряжено с большими первоначальными затратами. Таким образом, нагрев проводов обеспечивает удаление льда, но дорого обходится и не предотвращает нового обледенения.

Механическая очистка. Этот метод предполагает сбивание льда с проводов при помощи специальных приспособлений или вручную (например, длинными шестами или скребками). Механическое воздействие может удалять наледь (риски гололеда устраняются после факта), однако имеет ряд недостатков. Для работы требуется доступ к проводам, что нарушает движение поездов или работу линии на время очистки. Сбивание льда — это очень продолжительный и трудоемкий процесс, требующий бригад рабочих, и практически не реализуем на больших протяженных участках контактной сети. Кроме того, ударные воздействия могут со временем повредить провод. В итоге механическую очистку применяют разве что на коротких отрезках или при

чрезвычайных ситуациях, а основной борьбой с гололедом остается нагрев.

Антиобледенительные реагенты. Физико-химический подход предусматривает нанесение на провод специальных составов (реагентов), препятствующих образованию льда. В железнодорожной практике используют, например, гидрофобные смазки или растворы, образующие водоотталкивающую пленку на проводе. Такой профилактический метод действительно предотвращает или замедляет обледенение проводов. Пример — во Франции перед заморозками контактные провода покрывают особой гидрофобной биоразлагаемой смазкой, уменьшающей прилипание воды. Достоинство метода — отсутствие необходимости отключать линию и мгновенный эффект. Однако покрытие реагентами имеет ограниченный срок действия: со временем смазка стирается токоприемниками и воздействием погоды. Регулярно наносить состав на сотни километров проводов затруднительно и дорого. Таким образом, антиобледенительные жидкости эффективны, но требуют частого обновления, что снижает их практичность на больших сетях.

Гидрофобные покрытия контактного провода (решение по патенту RU 2827574):

Контактный провод с водоотталкивающим (гидрофобным) [3, 10, 11] покрытием объединяет преимущества физико-химического метода с долговечностью стационарного решения. Существуют разные типы таких покрытий: наноструктурированные, полимерные, кремний-органические и комбинированные системы. Их общий принцип — создать на поверхности провода слой, к которому не прилипают вода и лед. Ниже приведены характеристики каждого типа:

Наноструктурированные покрытия [5, 11–13]. Представляют собой сверхгидрофобные слои с микро-нанорельефом. За счет структуры и специальных материалов достигается очень боль-

шой краевой угол смачивания ($>150^\circ$), капли воды скатываются с провода, прежде чем замерзнуть. Такой «лотос-эффект» резко снижает образование наледи: влага не задерживается, а уже образовавшийся лед имеет минимальную площадь сцепления. Наноструктурированные покрытия наиболее эффективны в предотвращении гололеда, однако их недостаток — потенциально меньшая стойкость к износу (рыхлый нанорельеф может стираться при длительном трении токоприемника).

Полимерные покрытия. Специальные лакокрасочные или пленочные материалы, образующие гладкий водоотталкивающий слой на проводе. Как правило, это полимеры на основе нефтепродуктов (краски, лаки). Полимерное покрытие не такое сверхгидрофобное, как наноструктурированное, но более устойчивое к механическому воздействию. Оно создает барьер между металлом и окружающей средой, уменьшая смачивание и одновременно защищая металл от коррозии. Преимущество — относительно простое нанесение и обновление (путем окрашивания провода), недостаток — умеренное снижение льдообразования (может задерживать наледь при длительном обливании дождем).

Кремнийорганические (силиконовые) покрытия. Включают органосиликатные или силиконовые составы, способные химически связаться с поверхностью металла, образуя прочную гидрофобную пленку. Такие покрытия часто тонкие и прозрачные, «сорбируются» на поверхности провода. Они придают длительный водоотталкивающий эффект и терпимы к температурным перепадам. Силиконовые составы эластичны, поэтому хорошо выдерживают вибрации и температурное расширение провода без растрескивания. Их гидрофобность может быть средней (как у полимеров) либо усиленной добавками. Важное достоинство — простота обновления: можно нанести новый слой поверх старого по мере износа.

Комбинированные покрытия. Совмещают элементы вышеперечисленных типов для достижения оптимального результата. Например, распространенный подход — наносить двухслойное покрытие: сначала прочный полимерный грунт для адгезии к металлу, а поверх него наноструктурированный слой (например, с наночастицами кремнезема или фторполимера). Такой комбинированный материал устойчив к истиранию и одновременно обладает супергидрофобностью. Другой вариант — вводить в полимерную матрицу кремнийорганические добавки. Комбинированные решения позволяют достичь длительного эффекта: покрытие держится месяцы и годы, обеспечивая защиту ото льда на весь зимний сезон и дольше. В результате провод с таким покрытием длительное время не обледеневает, сохраняя свои свойства даже при многократных циклах намокания и замерзания.

Эффективность методов. Традиционные методы в целом борются с уже образовавшимся льдом, тогда как гидрофобные покрытия призваны предотвратить его образование с самого начала. Электрообогрев и механическое сбивание позволяют восстановить работу линии, но не исключают повторного обледенения при новых осадках. К тому же при сильных осадках лед может нарастать быстрее, чем успевает таять или сбиваться. Антиобледенительные реагенты и гидрофобные покрытия работают превентивно: они значительно уменьшают или вовсе исключают появление гололеда на проводе. Сверхгидрофобные поверхности показали свою высокую эффективность в испытаниях — образование льда снижается настолько, что традиционные методы могут не понадобиться. При экстремальных условиях (длительный ледяной дождь) наледь все же может появляться даже на покрытом проводе, но ее слой тоньше и держится слабо. Такой лед легко отделяется под действием ветра или вибраций либо счищается токоприемником

без повреждений. В итоге провод с покрытием значительно реже нуждается в обслуживании: по сравнению с обычным проводом количество случаев обледенения и связанных с ними задержек сокращается многократно.

Финансовый анализ

Первоначальные затраты (капиталовложения)

Традиционный провод (без покрытия): стоимость базового контактного провода (например, медного) составляет условно ~1,5 млн руб/км (включая материал и монтаж) [14]. Дополнительных расходов на инфраструктуру нет, если не устанавливать системы обогрева.

Нагрев проводов (традиционный метод): требует вложений в оборудование — например, установку нагревательного кабеля (системы типа BlueWire) вдоль провода. Это повышает капитальные затраты примерно на 30–40% (до ~2 млн руб/км в нашем расчете). Преимущество — система интегрируется в контактную сеть и готова к работе автоматически, но изначально это значительные инвестиции. Кроме того, сам по себе метод нагрева проводов считается неэффективным расходом энергии, что отражается на экономической целесообразности.

Механическая очистка (традиционный метод): специальные снегоочистительные поезда, скребки на токоприемниках или бригады для сбивания льда не требуют модернизации провода, поэтому стартовые затраты минимальны. Достаточно стандартного провода (~1,5 млн руб/км). Инфраструктурных изменений нет, но потребуются техника (например, вышки, спецвагоны) и обучение персонала — эти расходы обычно относятся к эксплуатационным.

Антиобледенительные реагенты: нанесение химических реагентов (гликоли, солевые растворы и пр.) не требует специального про-

вода — стартовые затраты ограничиваются оборудованием для нанесения (например, насосы, разбрызгиватели) и невелики — ~50 тыс. руб/км. Основные затраты приходятся на регулярную закупку реагентов, т. е. на эксплуатацию.

Провод с кремнийорганическим покрытием: органосиликоновые (силиконовые) покрытия также увеличивают цену провода (до 15–20%). Итоговая стоимость ~1,7 млн руб/км. Технология нанесения может быть чуть сложнее, но в целом установка такого провода не требует специальных изменений в контактной сети.

Провод с наноструктурированным покрытием: нанотекстурированные супергидрофобные слои (например, на основе SiO₂ или наночастиц оксидов) наиболее технологически сложны, повышая базовую цену ощутимо (на ~20–25%, до ~1,8 млн руб/км). Дороже исходных материалов, и необходим контроль качества наноструктуры. Тем не менее монтаж остается штатным.

Комбинированное решение (по патенту RU 2827574): включает рельефную обработку и многослойное покрытие (теплоизолирующее плюс гидрофобное). Ожидаемо, это самый дорогой вариант провода — оценочно на 30–35% дороже обычного (~2,0 млн руб/км) из-за дополнительной обработки поверхности и материалов. Первоначально требуются заметные инвестиции, однако цель — практически исключить обледенение пассивными средствами.

Эксплуатационные расходы

Традиционный провод, механическая очистка: основные расходы — регулярное удаление наледи вручную или техникой. Каждой зимой приходится задействовать бригады; предположим ~5 выездов/сезон по ~40 тыс. руб/км каждый (топливо, труд, амортизация), итого ~200 тыс. руб/км в год. Кроме того, частое обледенение и его удаление приводят к износу контактного провода (при удачах, скребках) — это сокращает его срок службы

и вызывает внеплановые ремонты. Действительно, механическое удаление льда трудоемко и «механически нагружает контактный провод», что со временем может потребовать досрочной замены провода или ремонта креплений.

Нагрев проводов: эксплуатационные затраты включают электроэнергию для обогрева и обслуживание системы. Преимущество в том, что отпадает необходимость в частых выездах бригад. Энергозатраты на расплавление льда относительно невелики — нагрев 1 км провода в сильный гололед может потребовать десятки кВт·ч энергии (условно ~50 тыс. руб/год на км при нескольких циклах обогрева). Это существенно ниже расходов на ручную очистку. Таким образом, ежегодные затраты снижаются примерно до ~50–70 тыс. руб/км. Снижается и износ оборудования: устранение льда нагревом предотвращает искрение и износ графитовых вставок токоприемника. Однако следует учитывать техническое обслуживание самой системы обогрева и возможные потери энергии.

Антиобледенительные реагенты: требуют регулярного применения в преддверии или во время обледенения. Например, при ~5 обработках за зиму расход реагента и труд может обходиться (~30 тыс. руб/км за сезон). В год это ~100–150 тыс. руб/км. Данный метод менее трудозатратен, чем физическое сбивание льда, однако химикаты нужно закупать постоянно. Возможны побочные эффекты: реагенты могут вызывать коррозию или загрязнение окружающей среды, поэтому применение ограничено.

Полимерное гидрофобное покрытие: со временем покрытие утрачивает свойства под воздействием среды (ультрафиолет, абразивная пыль, циклы замерзания) и требует обновления. По данным исследований, некоторые органические гидрофобные покрытия начинают терять антиобледенительные свойства уже после ~20 циклов обледенения/оттаивания. Предположительно, что

полимерное покрытие нужно обновлять примерно раз в 1–2 года. Если покров наносится как лак/краска, затраты на его обновление можно оценить в ~100 тыс. руб/км (с учетом материалов и работы) каждые 2 года, то есть ~50 тыс. руб/км в год. В остальном такой провод почти не требует специальных работ по удалению льда — наледь либо не образуется, либо сходит сама при небольших колебаниях/ветре благодаря низкому сцеплению. В очень сильный гололед возможно частичное обледенение, но его объем значительно меньше, поэтому удаление может не потребоваться вовсе или понадобится реже. Предположительно, ежегодные расходы составят около ~120 тыс. руб/км (учет обновления покрытия + редких очисток), что гораздо ниже исходных ~200 тыс. руб. при отсутствии покрытия.

Кремнийорганическое покрытие (например, силиконовое): характеризуется высокой гидрофобностью и устойчивостью. Многие силиконовые покрытия служат 3+ года на открытом воздухе. Допустим, обновление потребуется раз в ~3 года (частота может быть меньше благодаря стойкости к УФ и температуре). Затраты на возобновление — порядка ~200 тыс. руб/км раз в 3 года (около 67 тыс. руб/год). Благодаря гидрофобности наледь либо не образуется, либо образуется рыхлой и тонкой. Расходы на ликвидацию наледи минимальны (может потребоваться эпизодическая очистка при экстремальных условиях, скажем, 1 раз в год ~30–40 тыс. руб.). Итого ежегодные расходы составляют порядка ~100 тыс. руб/км.

Наноструктурированное покрытие: такие покрытия (например, нанокompозиты с оксидами, фторсодержащие слои) обладают супергидрофобностью и повышенной прочностью. Тем не менее со временем загрязнение или износ могут снизить их эффективность, поэтому требуется профилактика. Предположительно, обновление наноструктурированного слоя (или нанесение нового) нужно раз в 3–5 лет. Условно заложим

обновление раз в 3 года (~150 тыс. руб., или 50 тыс. руб. в год). Оставшиеся эксплуатационные расходы незначительны — подобно другим покрытиям наледь задерживается слабо и отваливается сама. Возможно, лишь изредка придется сбивать отдельные отложения в аномальных случаях. Оценочно ежегодно понадобится ~80 тыс. руб/км (большая часть — резерв на восстановление покрытия).

Комбинированное решение (рельеф + теплоизоляция + гидрофобность): патентованное решение ориентировано на минимизацию активного вмешательства. Большая часть воды стекает, а та, что замерзает, — в нижней части провода, откуда лед легко отпадает. Это значит, что плановые работы по удалению льда практически не требуются. Эксплуатационные затраты сводятся к мониторингу состояния покрытия и его обновлению раз в несколько лет. Поскольку присутствует и теплоизолирующий слой, и рельеф, даже частичная потеря гидрофобности не приведет сразу к сильному обледенению — система обладает «защитой от сбоев». Можно предположить обновление гидрофобного слоя раз в ~5 лет (~300 тыс. руб., т. е. ~60 тыс. руб/год). Итого ежегодные расходы оцениваются в ~60 тыс. руб/км, что в 3-4 раза ниже, чем при отсутствии такого покрытия. К тому же отсутствуют расходы на регулярную очистку и связанные простои — контактная сеть остается работоспособной.

Экономический эффект

Сокращение затрат на устранение наледи: все гидрофобные решения существенно снижают расходы на борьбу с гололедом. Для сравнения: традиционный подход (без покрытия) ~200 тыс. руб/км в год, а с покрытием — десятки тысяч. Отсутствие обледенения позволяет снизить нагрузку на контактный провод. Во-первых, не происходит накопления тяжелого льда, способного деформировать провод или опоры.

Во-вторых, значительно реже применяются механические методы очистки (скребки, удары), которые сами по себе изнашивают провод. Например, при использовании обогрева BlueWire отмечено снижение механического износа как провода, так и токоприемников. Гидрофобные покрытия аналогично защищают провод от лишних воздействий. Это позволяет продлить межремонтные интервалы и срок службы контактного провода на несколько лет. Если обычный провод служит, допустим, ~25 лет, то с защитным покрытием срок может увеличиться на 20–30% (меньше аварийных замен, меньше коррозии и усталости металла). Продление службы — скрытый экономический эффект: откладывается дорогостоящая замена провода.

Снижение аварийности и ремонтов: гололед — частая причина обрывов и аварий в контактной сети. Налепший лед может привести к обрыву провода или падению конструкций, вызывая дорогие аварийные ремонты и простои в движении. Применение покрытий резко снижает вероятность таких инцидентов. Повышается надежность электроснабжения транспорта зимой, сокращается число аварийных выездов. Меньше внеплановых отключений — меньше штрафов и потерь от сбоев движения. Эти косвенные выгоды трудно напрямую учесть в расчете, но они значительно улучшают экономику проекта.

Срок окупаемости

Методика расчета: окупаемость определяем как время, за которое накопленная экономия на эксплуатационных расходах компенсирует повышенные первоначальные инвестиции. Базой сравнения служит традиционный провод с механической очисткой (как наиболее распространенный метод борьбы с наледью). Для каждого варианта рассчитана примерная разница в первоначальной стоимости и ежегодной экономии, по которой

Таблица 2. Гидрофобные покрытия в сравнении с традиционными методами борьбы с обледенением

| Решение | Первоначальные затраты (тыс. руб/км) | Ежегодные эксплуатационные затраты (тыс. руб/км·год) | Оценочная экономия по сравнению с обычным проводом, тыс. руб/год | Окупаемость (лет) | Примечания |
|--|--------------------------------------|--|--|-------------------|---|
| Без покрытия (базовый) | ~1500 (обычный провод) | ~200 (ручная очистка наледи) | — | Базовый | Регулярное обледенение, расходы на очистку высоки |
| Нагрев провода (кабелем) | ~2000 (провод + система) | ~50 (энергия, техобслуживание) | ~150 | ~3,3 | Снижает трудозатраты, минимизирует наледь; продлевает жизнь оборудования |
| Антиобледенительный реагент | ~1550 (оборуд. + провод) | ~150 (реагент + работа) | ~50 | ~1 | Низкие капвложения, но частое применение; возможна коррозия, экология под вопросом. |
| Гидрофобное покрытие — полимерное | ~1650 (провод с покрытием) | ~120 (обновление + редкая очистка) | ~80 | ~2 | Фторполимеры, тефлон; окупаемость быстрая, требуется обновление покрытия ~1 раз в 1–2 года |
| Гидрофобное покрытие — кремний-органическое | ~1700 | ~100 | ~100 | ~2 | Силиконовые составы; долговечнее, реже обновление (~1 раз в 3 года), высокая водоотталкиваемость |
| Гидрофобное покрытие — наноструктурированное | ~1800 | ~80 | ~120 | ~2,5 | Супергидрофобная наноповерхность; лед не прилипает, покрытие работает ~3–5 лет до обновления |
| Комбинированное решение (патент RU 2827574) | ~2000 | ~60 | ~140 | ~3,5 | Рельеф + теплоизоляция + гидрофобность; минимизирует образование льда, обслуживание сводится к мониторингу покрытия |

вычислен срок окупаемости. Результаты сведены в табл. 2.

Анализ результатов: из табл. 2 видно, что все рассмотренные гидрофобные покрытия окупаются достаточно быстро — в пределах нескольких лет. Наиболее «дешевые» решения (например, полимерное покрытие) дают быструю отдачу (~2 лет) благодаря низкой доплате за провод и существенной экономии на очистке. Более дорогие наноструктурированные и комбинированные покрытия окупаются чуть дольше (2–4 года), но все равно в пределах разумного срока службы. Для сравнения добав-

лены традиционные методы: обогрев окупается за ~3 года за счет экономии на ручном труде, а химическая обработка имеет малый срок окупаемости (~1 год) с точки зрения затрат, хотя ограничивается экологическими факторами. Таким образом, внедрение гидрофобных покрытий по патенту RU 2827574 и аналогичных технологий подтверждает свою эффективность: несмотря на более высокую цену провода, резкое снижение расходов на борьбу с наледью и продление ресурса оборудования позволяют вернуть инвестиции через несколько зимних сезонов эксплуатации.

Выводы и рекомендации

Анализ показывает, что технология, описанная в патенте RU 2827574 (контактный провод с гидрофобным покрытием), является рентабельной и перспективной для борьбы с обледенением. По сравнению с традиционными методами, инновационный провод обеспечивает превентивную защиту от гололеда, практически исключая образование наледи на контактной сети. Это приводит к значительному снижению эксплуатационных затрат (меньше энергии на обогрев, реже требуется очистка, меньше аварий), а также к повышению надежности работы железнодорожного транспорта в зимний период. Хотя стоимость такого провода выше обычного, совокупная экономия средств на обслуживании и аварийных ремонтах делает его внедрение экономически оправданным уже в среднесрочной перспективе.

Рекомендуется поэтапно внедрять контактные провода с противообледенительным покрытием на железных дорогах в регионах с частыми гололедами — в первую очередь на Севере Европы и в северных/сибирских районах России. Именно там выгода будет наибольшей, учитывая суровые зимние условия. Для начала целесообразно оснастить таким проводом наиболее критичные участки: линии, от которых зависит движение на крупных направлениях, горные перевалы, зоны с историей частых обрывов из-за льда. Опыт энергетической отрасли (например, испытания проводов с нанопокрытием во ФГУП «Крыловский ГНЦ» по заказу Камского кабельного завода) [14, 15] уже подтвердил эффективность и надежность подобных решений. Это дает основания полагать, что и на железнодорожной контактной сети результат будет положительным.

Для железных дорог Северной Европы (например, Финляндия, Швеция, Норвегия) также актуально внедрение данной технологии. В этих странах уже применяются различные меры против

гололеда — от обогрева до специальных поездов-деобледенителей, и гидрофобные покрытия могут стать отличным дополнением или альтернативой таким подходам. Их использование позволит обеспечить более стабильное энергоснабжение электроподвижного состава в зимний период без перерывов на очистку проводов. Снижение числа обрывов контактного провода напрямую повысит пунктуальность движения поездов, что важно для пассажирского сообщения и грузовых цепочек.

В заключение внедрение технологии патента RU 2827574 рекомендуется как технически и экономически эффективное. Рентабельность подтверждается сокращением издержек и окупаемостью вложений в разумные сроки, а надежность — испытаниями и практическим использованием гидрофобных покрытий в электроэнергетике. Железнодорожным администрациям целесообразно включить данный инновационный провод в программы модернизации контактной сети на территориях с холодным климатом. Это инвестиция, которая окупится не только финансово, но и повышенной безопасностью и бесперебойной работой транспорта зимой.

Список источников

1. Паскарь И. Н. Борьба с обледенением проводов на линиях электропередач / И. Н. Паскарь, А. А. Чернослив, О. Н. Скворцов. — Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2015. — 145 с.
2. Санакулов А. Х. Совершенствование работы токоприемников подвижного состава с контактной сетью / А. Х. Санакулов, А. Н. Сафин // Проектирование и исследование технических систем: межвузовский научный сборник. — Набережные Челны: ИНЭКА, 2010. — Вып. № 2(16). — С. 61–67.
3. Васильев Ю. А. Предотвращение и ликвидация гололедных образований в распределительных сетях ОАО «Сетевая компания» / Ю. А. Васильев, С. А. Гребнев. — Казань: ОАО «Сетевая компания», 2012. — 76 с.

4. Дьяков А. Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях / А. Ф. Дьяков. — Пятигорск: РП «Южэнергонадзор», 2000. — 284 с.
5. European Railway Agency. Best Practices for Winter Resilience in Rail Infrastructure: Technical Report ERA/2020/TR/01. Brussels, 2020. — 45 p.
6. SNCF. How We Meet the Challenges of Extreme Cold. — 2021. — URL: <https://www.groupe-sncf.com/en/group/behind-the-scenes/traffic-flows/extreme-cold> (дата обращения: 15.05.2025).
7. Neftegaz.RU. Провода с антигололедным покрытием — надежная защита ЛЭП зимой. — URL: <https://neftgaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/761508-provoda-s-antigololednym-pokrytiem-nadezhnaya-zashchita-ler-zimoy/?ysclid=me06i2tbt532923411> (дата обращения: 12.01.2024).
8. Патент № 2827574 Российская Федерация, С-1 РФ, МПК 01В 5/2. Контактный провод с антиобледенительным покрытием для воздушных линий электропередач / В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, В. И. Моисеев; заявл. № 2024106114 от 05.03.2024; Бюл. 28.
9. КузSTU. Методы борьбы с гололедом на проводах ЛЭП: сб. материалов. — Кемерово: КузГТУ, 2015. — 89 с.
10. Zhang Y. Advanced Anti-Icing Coatings for Railway Contact Wires: A Review of Hydrophobic and Photothermal Materials / Y. Zhang, X. Wang, H. Li // *Materials & Design*. — 2023. — Vol. 225. — Pp. 111–123. — DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111123.
11. Wang L. Durable Superhydrophobic Coatings for Ice Prevention in Extreme Climates: Experimental and Economic Analysis / L. Wang, T. Chen, R. Zhang // *Cold Regions Science and Technology*. — 2021. — Vol. 180. — Pp. 103–115.
12. Бойнович Л. Б. Методы борьбы с обледенением ЛЭП: перспективы и преимущества новых супергидрофобных покрытий / Л. Б. Бойнович, А. М. Емельянов // *Журнал ЭЛЕКТРО*. — 2011. — № 6.
13. Buitenhuis J. Reduction of ice adhesion on nanostructured and nanoscale slippery surfaces / J. Buitenhuis, L. Xu, M. E. H. van der Meer, C. G. J. Koenders et al. // *Applied Surface Science*. — 2023. — Vol. 630. — Art. 157570.
14. ГОСТ 839—2019. Провода для воздушных линий электропередачи. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019. — 32 с.
15. Камский кабель. Новые компактированные провода АСП с антиобледенительным покрытием: пресс-релиз. — Пермь, 2021. — 5 с.

Дата поступления: 29.05.2025

Решение о публикации: 14.07.2025

Контактная информация:

БАРАУСОВ Виктор Александрович — руководитель проекта; barausovv@gmail.com

БУБНОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук, проф.; bubnov1950@yandex.ru

МОИСЕЕВ Владимир Иванович — д-р техн. наук, проф.; moiseev_v_i@list.ru

Efficient Performance of an Innovative Contact Wire with an Anti-Icing Coating

V. A. Barausov¹, V. P. Bubnov², V. I. Moiseev²

¹OOO “GC IMSAT”, 7, Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Barausov V. A., Bubnov V. P., Moiseev V. I. Efficient Performance of an Innovative Contact Wire with an Anti-Icing Coating // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 631-642. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-631-642

Summary

Purpose: To ascertain the efficiency of special contact wire application (SCW) in ensuring the rolling stock operational capacity in conditions of drip icing. Drip icing is most intense at air temperatures ranging from 0 to –5 °C during periods of “wet snowfall” and wind. **The principle of the innovative proposal.** The contact wire features a specially designed relief in its upper section, which is factory-rolled and has a thin, heat-insulating anti-icing coating with hydrophobic properties that preserves the shape of the relief. The SCW special relief and hydrophobic properties slow down the removal of the released heat from crystallization of water droplets deposited on the wire. This results in the formation of an ice layer, which rapidly transforms into a substantial ice deposit, forming an icy-snow “clutch”. Atmospheric water that settles on the wire head accumulates on it in the form of large droplets that break down even before they freeze. The majority of the water is thrown downwards from the SCW before it freezes, and a small part of it freezes on the lower section of the wire, changing the form of ice deposition. Instead of a large and solid ice-snow clutch covering the wire from all sides, “icicles” with a small area of contact with the wire are formed on the wire. They can be removed relatively easily, mechanically or chemically, but in the event of strong winds causing the wires to sway, they will fall off. **Results:** A thorough review of ice control methods has been conducted from the perspective of efficiency, incorporating a financial analysis of initial costs, operating expenses, economic impact, and the payback period. The efficiency of an innovative approach to the application of SCW has been demonstrated, encompassing the creation of a raised surface relief on the upper section of the wire in the area of its head and groove, by applying a thin, two-layer coating that preserves the surface relief. The primary function of the initial inner coating is to provide thermal insulation, while the secondary coating serves to ensure the non-wettability (hydrophobicity) of the wire surface. The innovative SCW has been proven to be effective in preventing the heat removal in the phase of water crystallization on the wire surface and breaking the water film on the wire surface to form large droplets that roll down before the freezing point.

Keywords: Contact wire, icing, heat transfer, phase transition, relief surface, hydrophobic coating, hydrodynamics of droplets, turbulence, simulation, finite difference method.

References

1. Paskar' I. N., Chernosliv A. A., Skvortsov O. N. *Bor'ba s obledeneniem provodov na liniyakh elektroperekhoda* [Ice prevention of wires on power transmission lines]. Kemerovo: KuzSTU Publ., 2015, 145 p. (In Russian)

2. Sanakulov A. Kh., Safin A. N. *Sovershenstvovanie raboty tokopriemnikov podvizhnogo sostava s kontaktnoi set'iu* [Improving the performance of current collectors of

rolling stock with the contact network]. *Proektirovanie i issledovanie tekhnicheskikh sistem: mezhvuzovskii nauchnyi sbornik* [Design and research of technical systems: interuniversity scientific collection]. Naberezhnye Chelny: INEKA Publ., 2010, Iss. 2(16), pp. 61–67. (In Russian)

3. Vasil'ev Iu. A., Grebnev S. A. *Predotvrashchenie i likvidatsiya goloednykh obrazovaniy v raspredelitel'nykh setyakh OAO “Setevaya kompaniya”* [Prevention and

elimination of ice formations in distribution networks of JSC “Grid Company”]. Kazan: Setevaya kompaniia Publ., 2012, 76 p. (In Russian)

4. D’iakov A. F. *Predotvrashchenie i likvidatsiia goloednykh avarii v elektricheskikh setiakh* [Prevention and elimination of ice accidents in electrical networks]. Pyatigorsk: RP “Yuzhenergotekhnadzor” Publ., 2000, 284 p. (In Russian)

5. European Railway Agency. Best Practices for Winter Resilience in Rail Infrastructure: Technical Report ERA/2020/TR/01. Brussels, 2020. 45 p.

6. SNCF. How We Meet the Challenges of Extreme Cold. 2021. Available at: <https://www.groupe-sncf.com/en/group/behind-the-scenes/traffic-flows/extreme-cold> (accessed: May 15, 2025).

7. *Provoda s antigolednym pokrytiem — nadezhnaia zashchita LEP zimoi* [Wires with anti-icing coating — reliable protection of power lines in winter]. Available at: <https://neftegaz.ru/science/Oborudovanie-uslugi-materialy/761508-provoda-s-antigolelednym-pokrytiem-nadezhnaya-zashchita-lep-zimoy/?ysclid=me06i2tbt532923411> (accessed: January 12, 2025). (In Russian)

8. Bubnov V. P., Barausov V. A., Moiseev V. I. *Kontaktnyi provod s antiobledenitel’nym pokrytiem dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi* [Contact wire with anti-icing coating for overhead power lines]. Patent RF, no. 2827574, 2024.

9. *KuzSTU. Metody bor’by s goloedom na provodakh LEP: sb. materialov* [Methods of fighting ice on power lines: collection of materials]. Kemerovo: KuzSTU Publ., 2015. 89 p. (In Russian)

10. Zhang Y., Wang X., Li H. Advanced Anti-Icing Coatings for Railway Contact Wires: A Review of Hydrophobic and Photothermal Materials. *Materials & Design*, 2023, vol. 225, pp. 111–123. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111123.

11. Wang L., Chen T., Zhang R. Durable Superhydrophobic Coatings for Ice Prevention in Extreme Climates: Experimental and Economic Analysis. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, vol. 180, pp. 103–115.

12. Boinovich L. B., Emel’ianov A. M. Metody bor’by s obledeneniem LEP: perspektivy i preimushchestva novykh supergidrofobnykh pokrytii [Methods of fighting icing of power transmission lines: prospects and advantages of new superhydrophobic coatings]. *Zhurnal ELEKTRO* [Journal ELECTRO]. Moscow, 2011, Iss. 6. (In Russian)

13. Buitenhuis J., Xu L., Meer van der M. E. H., Koenders C. G. J. et al. Reduction of ice adhesion on nanostructured and nanoscale slippery surfaces. *Applied Surface Science*. Amsterdam: Elsevier, 2023, vol. 630, art. 157570.

14. *GOST 839—2019. Provoda dlia vozdushnykh liniĭ elektroperedachi. Tekhnicheskie usloviia* [GOST 839—2019. Wires for overhead power transmission lines. Technical specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 32 p. (In Russian)

15. *Kamskii kabel’. Novye kompaktirovannye provoda ASp s antiobledenitel’nym pokrytiem: press-reliz* [Kamskii kabel’. New compacted wires ASp with anti-icing coating: press release]. Perm, 2021, 5 p. (In Russian)

Received: May 29, 2025

Accepted: July 14, 2025

Author’s information:

Viktor Al. BARAUSOV — Project Manager;

barausovv@gmail.com

Vladimir Pet. BUBNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; bubnov1950@yandex.ru

Vladimir Iv. MOISEEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; moiseev_v_i@list.ru

УДК 629.4.027.2

Ускоренный метод испытания боковых рам инновационной тележки модели 18-9891

В. А. Чернов¹, Д. В. Даниленко², Л. В. Цыганская¹, С. О. Комиченко³, В. П. Ефимов⁴

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

²ООО «УК РМ РЕЙЛ», Российская Федерация, 430006, Саранск, ул. Лодыгина, 11

³АО «НВЦ «Вагоны», Российская Федерация, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

⁴ООО «УИЦ — Вагоны», Российская Федерация, 622007, Нижний Тагил, ул. Орджоникидзе, 22, оф. 28

Для цитирования: Чернов В. А., Даниленко Д. В., Цыганская Л. В., Комиченко С. О., Ефимов В. П. Ускоренный метод испытания боковых рам инновационной тележки модели 18-9891 // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 643–656. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-643-656

Аннотация

Цель: Научно обоснованный выбор и проведение экспериментальной отработки ускоренного метода усталостных испытаний литых несущих деталей инновационной тележки модели 18-9891. **Методы:** Применены методы экспериментальных исследований боковых рам тележки модели 18-9891 с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН) с использованием метода Локати. Метод основан на гипотезе линейного суммирования относительных усталостных повреждений при испытании натурной детали ступенчато возрастающей во времени нагрузкой. **Результаты:** Полученные результаты усталостных испытаний свидетельствуют о том, что применение метода Локати обеспечивает получение параметров кривой усталости боковой рамы при испытании одного образца. Стандартная методика усталостных испытаний боковых рам требует проведение испытаний 9 натурных деталей. **Практическая значимость:** Применение нового ускоренного метода усталостных испытаний обеспечивает значительное снижение затрат времени, материалов и испытательных ресурсов, как на стадии изготовления опытных образцов, так и в серийном производстве литых несущих деталей тележек грузовых вагонов.

Ключевые слова: Грузовая тележка, рама боковая, усталостная прочность, ускоренный метод испытаний.

В последние годы проблема ускоренного определения предела выносливости материалов и натурных деталей приобрела особое значение, так как на предприятиях и в проектных организациях ограничены возможности проводить длительные и дорогостоящие испытания на усталость как образцов материалов, так и натурных элементов конструкций. Тем не менее развитие современной науки и техники в области вагоностроения требует расширения круга вопросов, подлежащих исследованию

в области усталости материалов и натурных деталей, в сжатые сроки.

Ускорение усталостных испытаний как на стадии изготовления опытных образцов, так и в серийном производстве литых несущих деталей тележек грузовых вагонов имеет большое значение. Снижение затрат времени, материалов и труда при проведении усталостных испытаний можно достигать путем изменения методических подходов. Большое значение имеет ускоренная оценка усталостной прочности натурных дета-

лей. Ускоренные испытания на ограниченном количестве деталей могут обеспечить в сжатые сроки оперативную оценку принятых технологических или конструктивных изменений.

Применение ускоренных методов испытаний литых деталей для оценки конструктивных и технологических изменений или замены марки стали целесообразно как с технической, так и с экономической точки зрения. Отработка ускоренных методов усталостных испытаний и их применения для контроля качества серийной продукции также приобретает большое значение для сокращения времени испытаний и материальных затрат на их проведение.

Выбор ускоренного метода испытаний обуславливается требуемой точностью данных, наличием определенного класса испытательных машин, трудоемкостью проведения испытаний и необходимым числом объектов испытаний. Анализ литературных данных по экспериментальной проверке ряда ускоренных методов испытаний в различных отраслях машиностроения как в РФ, так и за рубежом [1–3] показывает, что для исследования усталостной долговечности литых деталей на железнодорожном транспорте наиболее приемлемым и имеющим наибольшую точность при наименьшей трудоемкости является метод Локати.

Экспериментальные исследования по отработке ускоренного метода усталостных испытаний (метода Локати) проведены на рамах боковых инновационной тележки модели 18-9891 грузовых вагонов с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН). Метод Локати основан на применении гипотезы линейного суммирования относительных усталостных повреждений деталей (образцов) [2, 4, 5]. На основании данной гипотезы считается, что усталостное разрушение детали наступает тогда, когда сумма относительных повреждений достигает единицы, т. е.:

$$\sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где n_i — число циклов нагружения детали на данном уровне нагрузки;

N_i — число циклов до разрушения (долговечность) при этом же уровне нагрузки в условиях постоянной амплитуды;

k — число уровней нагрузки.

Метод Локати получил наибольшее распространение, так как обеспечивает удовлетворительную точность оценки предела выносливости (в пределах +8%) при высоком коэффициенте ускорения испытаний по сравнению с применяемыми методами испытаний натуральных деталей на усталость.

Рама боковая является основной несущей деталью трехэлементной двухосной тележки (изготовитель — ООО «ВКМ-Сталь»). Рамы боковые в соответствии с требованиями ГОСТ 33788—2016 [6] и других нормативных документов [7] должны подвергаться усталостным испытаниям для экспериментальной проверки сопротивления усталости с оценкой коэффициента запаса. В рамках проведения предварительных испытаний проведены усталостные испытания партии рам боковых, изготовленных по КД — черт. № 9891.01.00.001 [8]. Рамы боковые изготовлены из стали 20ГЛ, термообработка выполнена по технологии ООО «ВКМ-Сталь». Климатическое исполнение УХЛ 1 по ГОСТ 15150—69 [9].

Поставленные на испытания детали соответствовали требованиям КД, ТУ и ГОСТ 32400—2013 [10]. Отбор объектов испытаний проведен из имеющейся совокупности данной продукции методом отбора «вслепую» по ГОСТ 18321—73 [11] после ее приемки ОТК предприятия-изготовителя. Схема нагружения боковой рамы при проведении усталостных испытаний методом Локати приведена на рис. 1, общий вид ресурсных (на усталость) испытаний боковых рам приведен на рис. 2. Усталостные испытания боковых рам проведены по разработанной программе [12] с учетом требований методики [13].

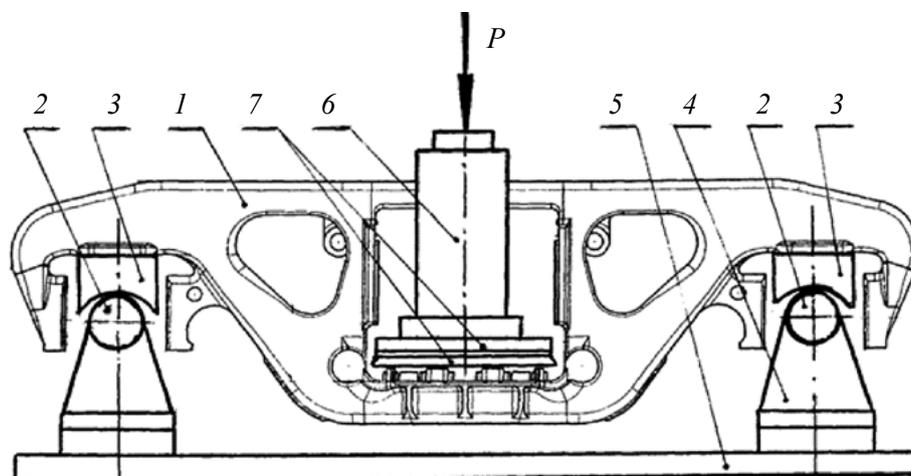


Рис. 1. Схема нагружения боковой рамы:

1 — рама боковая; 2 — катковая опора; 3 — переходник; 4 — тумба опорная;
5 — силовой стол станда; 6 — П-образное приспособление; 7 — система сегментов

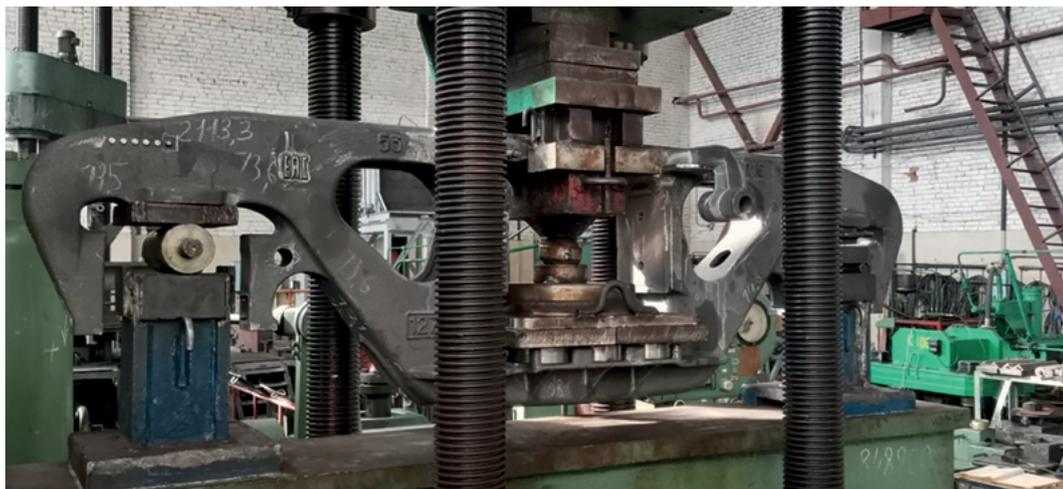


Рис. 2. Общий вид усталостных испытаний рамы боковой тележки модели 18-9891 методом Локати на испытательной машине (автор фото — С. О. Комиченко)

Испытания проведены в лабораторном корпусе при температуре окружающего воздуха +15–20 °С и влажности 55–65%. Каждую деталь испытывали при асимметричном цикле до разрушения. Частота действия переменных нагрузок находилась в пределах 5–6 Гц. Испытания проводились в непрерывном режиме с визуальным контролем усталостных трещин. После обнаружения трещины длиной 15–25 мм испытания продолжались до разрушения детали или до потери несущей способности. Под потерей несущей способ-

ности понималось такое повреждение детали циклической нагрузкой, при котором дальнейшее нагружение детали становилось невозможным из-за значительного уменьшения жесткости.

Экспериментальную проверку использования метода Локати проводили на боковых рамах тележки модели 18-9891, которые предварительно были испытаны на усталость по стандартной методике [13]. Количество боковых рам в партии составляло 9 деталей. По результатам статистической обработки усталостных испытаний боковых

рам тележки модели 18-9891 построены кривые усталости в амплитудных нагрузках (P_a) и числах циклов (N) до разрушения [6, 7].

Результаты усталостных испытаний боковых рам подвергнуты вероятностно-статистической обработке согласно требованиям ГОСТ 33788—2016 [6] и «Норм...» [7]. Уравнение кривой усталости боковой рамы, представленной в виде степенной функции, имеет вид:

$$P_{ai}^m N_i = \text{const}, \quad (2)$$

где P_{ai} — амплитудное значение нагрузки при циклических испытаниях;

N_i — число циклов до разрушения детали;

m — показатель степени в уравнении кривой усталости.

Корреляционное уравнение кривой усталости (уравнение линии регрессии) детали в координатах $(\lg P_a - \lg N)$, отражающее средневероятное положение кривой усталости испытанных боковых рам, определяется по формуле:

$$\lg P_{a,N} = (\lg P_a)_{\text{cp}} + \frac{1}{m} (\lg N_i - \lg N). \quad (3)$$

По уравнению линии регрессии вычисляется среднее (соответствующее вероятности $a = 0,5$) значение предела выносливости при базовом числе $N_0 = 10^7$ циклов по формуле:

$$(\lg P_a)_{0,5} = (\lg P_a)_{\text{cp}} + \frac{1}{m} [\lg N_0 - (\lg N)_{\text{cp}}]. \quad (4)$$

Коэффициент линейной корреляции экспериментальных данных определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\sum_1^n [\lg P_{ai} - (\lg P_a)_{\text{cp}}] \cdot [\lg N_i - (\lg N)_{\text{cp}}]}{(n-1) \cdot S_{\lg P_{ai}} \cdot S_{\lg N}}. \quad (5)$$

Показатель степени m уравнения кривой усталости вида $(P_{ai}^m \cdot N_i = \text{const})$ определяется по формуле:

$$m = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S_{\lg N}}{S_{\lg P_a}}. \quad (6)$$

Логарифм минимального возможного значения предела выносливости в амплитудах при других значениях односторонней вероятности a определяется по формуле:

$$(\lg P_a)_a^{\min} = (\lg P_a)_{0,5} + Z_a (S_{\lg P_a}^* + S_o + S_s), \quad (7)$$

где $Z_a = -1,645$ — квантиль нормального распределения для доверительной вероятности; $a = 0,05$ (вероятность неразрушения деталей равна 0,95);

$S_{\lg P_a}^*$ — мера индивидуального рассеивания частных пределов ограниченной выносливости относительно линии регрессии;

S_o — основная ошибка среднего выборочного значения предела выносливости;

S_s — основная ошибка меры индивидуального рассеивания предела выносливости.

Параметры данных кривых усталости использовались для экспериментальной отработки ускоренного метода испытаний (метода Локати). Достоверность определения предела выносливости дополнительно проверялась оценкой величины коэффициента линейной корреляции ρ . Критические значения коэффициента корреляции $[\rho]$ назначались по табл. 6 ГОСТ 33788—2016 [6].

Расчет основных статистических характеристик партии боковых рам приведен в табл. 1, кривая усталости, построенная в координатах $(\lg P_a - \lg N)$, показана на рис. 3.

Ускоренным методом Локати испытаны две боковые рамы. Испытания проведены при ступенчато-возрастающей нагрузке до разрушения детали. Режим испытаний, который является определяющим при ускоренных испытаниях по методу Локати, представляется следующим выражением:

Таблица 1. Результаты вероятностно-статистической обработки усталостных испытаний партии боковых рам

| № п/п | Наименование | Обозначение | Величина |
|-------|--|-------------------|----------|
| 1 | Среднеквадратическое отклонение логарифма амплитуд нагрузки | S_{LgP_a} | 0,03705 |
| 2 | Среднеквадратическое отклонение логарифма долговечности деталей | S_{LgN} | 0,28970 |
| 3 | Коэффициент линейной корреляции экспериментальных данных | ρ | -0,86354 |
| 4 | Мера индивидуального рассеивания частных пределов ограниченной выносливости относительно линии регрессии | $S_{LgP_a}^*$ | 0,01868 |
| 5 | Основная ошибка среднего выборочного значения предела выносливости | S_o | 0,00623 |
| 6 | Основная ошибка меры индивидуального рассеивания предела выносливости | S_δ | 0,00467 |
| 7 | Значение показателя степени в уравнении кривой усталости | m | -9,05451 |
| 8 | Значение предела выносливости на базе 10^7 циклов при $\alpha = 50\%$ вероятности неразрушения деталей | $(P_{a,N})_{0,5}$ | 27,45295 |
| 9 | Минимальное значение предела выносливости на базе 10^7 циклов при $\alpha = 95\%$ вероятности неразрушения деталей | $(P_{a,N})_{min}$ | 24,54286 |
| 10 | Коэффициент запаса сопротивления усталости | \tilde{n} | 3,90229 |

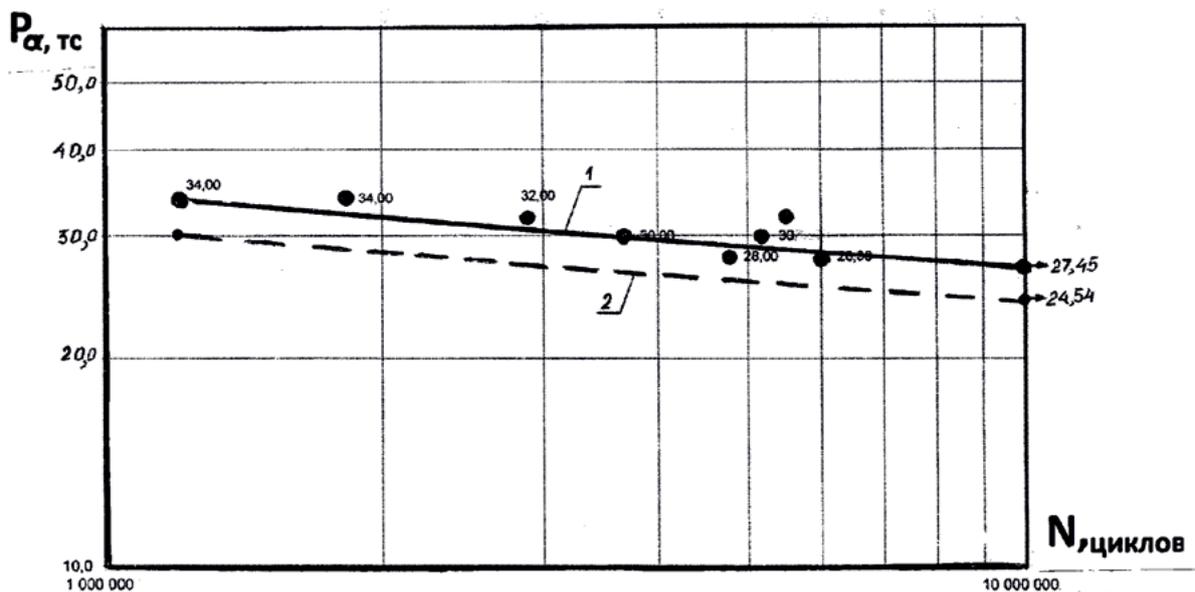


Рис. 3. Кривая усталости боковых рам тележки модели 18-9891 по результатам полных усталостных испытаний (9 деталей):
 1 — вероятность неразрушения $\alpha = 0,5$; 2 — вероятность неразрушения $\alpha = 0,95$

$$T = \frac{\Delta P_{ai}}{n_i^1}, \tag{8}$$

где ΔP_{ai} — изменение уровня нагрузки на ступени;

n_i^1 — число циклов перемен нагрузки на ступени.

Рамы боковые испытаны при двух режимах нагружения ступенчатовозрастающей нагрузкой:

Таблица 2. Режимы испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001), первый режим испытаний

| Число циклов нагружения на ступени, тыс. | Нагрузка, тс (кН) | | | |
|--|-------------------|------------|------------|------------|
| | P_{cp} | P_a | P_{max} | P_{min} |
| 0–500 | 42 (411,6) | 22 (215,6) | 64 (627,2) | 20 (196,0) |
| 500–1000 | 42 (411,6) | 24 (235,2) | 66 (646,8) | 18 (176,4) |
| 1000–1500 | 42 (411,6) | 26 (254,8) | 68 (666,4) | 16 (156,8) |
| 1500–2000 | 42 (411,6) | 28 (274,4) | 70 (686,0) | 14 (137,2) |
| До разрушения детали | 42 (411,6) | 30 (294,0) | 72 (705,6) | 12 (117,6) |

Таблица 3. Режимы испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001), второй режим испытаний

| Число циклов нагружения на ступени | Нагрузка, тс (кН) | | | |
|---|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| | P_{cp} | P_a | P_{max} | P_{min} |
| I уровень 0...1,5 · 10 ⁶ циклов | 42 (411,6) | 25,5 (250,2) | 67,5 (661,5) | 16,5 (161,7) |
| II уровень 1,5 · 10 ⁶ ...3,0 · 10 ⁶ циклов | 42 (411,6) | 27,0 (264,9) | 69,0 (676,2) | 15,0 (147,0) |
| III уровень 3,0 · 10 ⁶ ... 4,5 · 10 ⁶ циклов | 42 (411,6) | 28,5 (279,6) | 70,5 (690,9) | 13,5 (132,3) |
| IV уровень До разрушения детали | 42 (411,6) | 30,0 (294,0) | 72,0 (705,6) | 12,0 (117,6) |

Таблица 4. Результаты ускоренных усталостных испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (первый режим нагружения) — заводской № 20164

| Нагрузка на ступени P_{ai} , тс (кН) | Число циклов нагружения на ступени, n_i ($\times 10^3$) |
|--|---|
| 22 (215,6) | 500 |
| 24 (235,2) | 500 |
| 26 (254,8) | 500 |
| 28 (274,4) | 500 |
| 30 (294,0) | 4796 (до образования трещины) 4859 (разрушение детали) |

Режим I. $T = 0,4 \cdot 10^{-5}$ тс/цикл ($\Delta P_{ai} = 2$ тс; $n_i^1 = 5 \cdot 10^5$ циклов);

Режим II. $T = 1,0 \cdot 10^{-6}$ тс/цикл ($\Delta P_{ai} = 2,5$ тс; $n_i^1 = 1,5 \cdot 10^6$ циклов).

На каждом режиме испытано по одной боковой раме (черт. № 9891.01.00.001). T характеризует среднюю скорость роста амплитудных значений силы в процессе испытаний при ступенчато-возрастающей нагрузке и принимается постоянной при проведении испытаний методом Локати.

Таблица 5. Результаты испытаний боковой рамы 20164 (черт. № 9891.01.00.001) на последней ступени нагружения

| № рамы боковой | Число циклов нагружения, тыс.: | | Место разрушения |
|----------------|--------------------------------|--|------------------------|
| | до образования трещины | до разрушения или потери несущей способности | |
| 20164 | 4796 | 4859 | Угол рессорного проема |

Режимы испытаний приведены в табл. 2 и 3. Испытания боковых рам при ступенчатовозрастающей нагрузке проведены на двух режимах.

Результаты ускоренных усталостных испытаний боковых рам (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (первый режим нагружения) приведены в табл. 4.

Результаты испытаний боковой рамы на последней ступени нагружения приведены в табл. 5. Зона и характер разрушения боковой рамы показаны на рис. 4.



Рис. 4. Характер и зона усталостного разрушения боковой рамы 20164 тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) (автор фото — С. О. Комиченко)

Таблица 6. Результаты ускоренных усталостных испытаний боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (II режим нагружения) — заводской № 20162

| Нагрузка на ступени P_{ai} , тс (кН) | Число циклов нагружения на ступени, (n_i) |
|--|--|
| 25,5 (250,2) | $1,5 \cdot 10^6$ |
| 27,0 (264,9) | $1,5 \cdot 10^6$ |
| 28,5 (279,6) | $1,5 \cdot 10^6$ |
| 30,0 (294,0) | $3,867 \cdot 10^6$ (до образования трещины) $4,098 \cdot 10^6$ (разрушение детали) |

Таблица 7. Результаты испытаний боковой рамы 20162 (черт. № 9891.01.00.001) на последней ступени нагружения

| № рамы боковой | Число циклов нагружения, тыс.: | | Место разрушения |
|----------------|--------------------------------|--|------------------------|
| | до образования трещины | до разрушения или потери несущей способности | |
| 20162 | 3867 | 4098 | Угол рессорного проема |

Результаты ускоренных усталостных испытаний боковых рам (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати (II режим нагружения) приведены в табл. 6.

Результаты испытаний боковой рамы на последней ступени нагружения приведены

в табл. 7. Зона и характер разрушения боковой рамы показан на рис. 5.

На рис. 6 приведена графическая иллюстрация усталостных испытаний боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) ступенчато-возрастающей нагрузкой (методом Локати) при двух режимах нагружения. Кривые усталости боковых рам на рис. 6 приведены по амплитудному значению силы при вероятностях неразрушения $a = 0,20$; $a = 0,50$ и $a = 0,95$, при средней нагрузке цикла $P_m = 42$ тс (412 кН).

Число циклов n_i , где $i = 1, \dots, k - 1$ (k — номер ступени, на которой произошло разрушение) принимается постоянным (см. табл. 5 и 7). Для оценки (P_{ar}) при вероятности неразрушения a левая ветвь кривой усталости представляется статистически (см. рис. 6). Далее вычислены три суммы накопленных повреждений:

$$(\sum n_i / N_i)^u; (\sum n_i / N_i)^*; (\sum n_i / N_i)^0. \quad (9)$$

Предел выносливости — случайная величина, которая находится в переходной области кривой усталости. Расчетная оценка сумм накопленных усталостных повреждений охватывает всю переходную область вынос-



Рис. 5. Характер и зона усталостного разрушения боковой рамы 20162 тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) (автор фото — С. О. Комиченко)

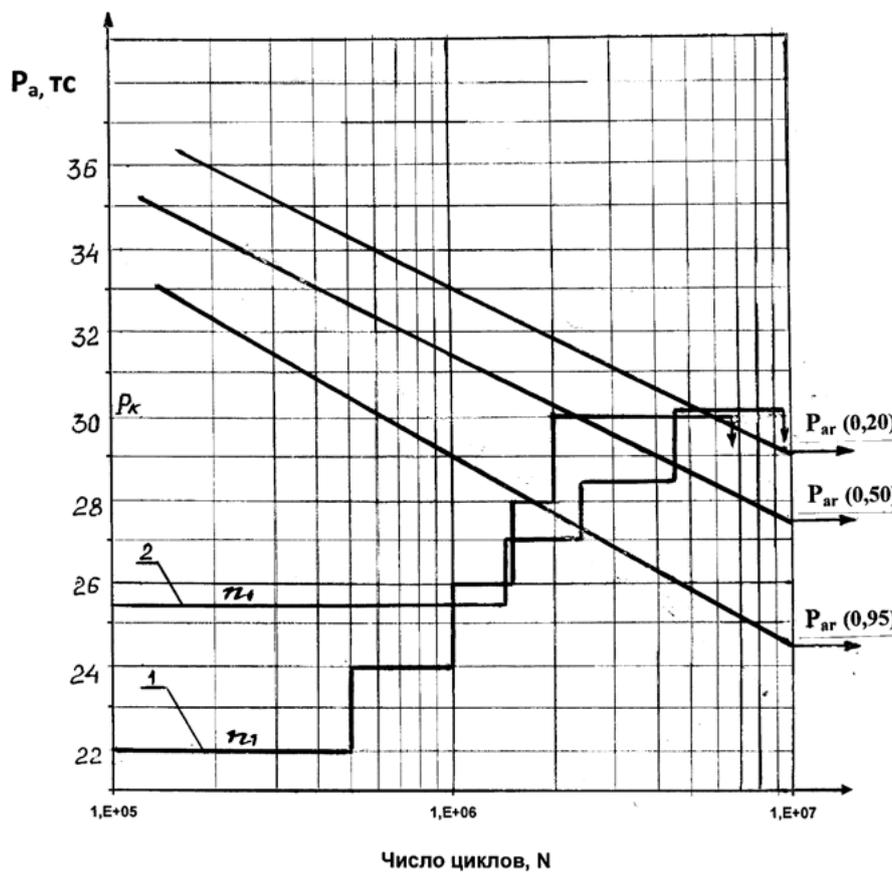


Рис. 6. Графическая иллюстрация усталостных испытаний боковых рам ступенчатовозрастающей нагрузкой при двух режимах нагружения:
1 — I режим нагружения; 2 — II режим нагружения

Таблица 8. Результаты вычисления суммы относительной долговечности боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) — I режим испытаний (№ рамы боковой 20164)

| Ступни (уровни) нагружения боковой рамы | Амплитуда циклической нагрузки на ступени (P_{ai}), тс (кН) | Число циклов нагружения на ступени (n_i) | Долговечность на данном режиме, при $P = 0,20$. N_p , (циклов) | (n_i / N_i) | Долговечность на данном режиме, при $P = 0,50$. N_p , (циклов) | (n_i / N_i) | Долговечность на данном режиме, при $P = 0,95$. N_p , (циклов) | (n_i / N_i) |
|--|---|--|---|---------------|---|---------------|---|---------------|
| 1 ступень | 22 (215,6) | $0,5 \cdot 10^6$ | $7,1 \cdot 10^8$ | 0,001 | $82 \cdot 10^6$ | 0,006 | $3,6 \cdot 10^7$ | 0,014 |
| 2 ступень | 24 (235,2) | $0,5 \cdot 10^6$ | $2,2 \cdot 10^8$ | 0,003 | $18 \cdot 10^6$ | 0,028 | $1,1 \cdot 10^7$ | 0,046 |
| 3 ступень | 26 (254,8) | $0,5 \cdot 10^6$ | $6,2 \cdot 10^7$ | 0,009 | $12 \cdot 10^6$ | 0,042 | $4,7 \cdot 10^6$ | 0,107 |
| 4 ступень | 28 (274,4) | $0,5 \cdot 10^6$ | $2,3 \cdot 10^7$ | 0,025 | $7,6 \cdot 10^6$ | 0,066 | $1,8 \cdot 10^6$ | 0,287 |
| 5 ступень (до разрушения) | 30 (294,0) | $4,859 \cdot 10^6$ | $6,1 \cdot 10^6$ | 0,084 | $2,3 \cdot 10^6$ | 2,104 | $6,4 \cdot 10^5$ | 7,592 |
| $(\sum n_i / N_i)a = 0,20 = 0,122$; $(\sum n_i / N_i)a = 0,50 = 2,246$; $(\sum n_i / N_i)a = 0,95 = 8,037$ | | | | | | | | |

Таблица 9. Результаты вычисления суммы относительной долговечности боковой рамы (черт. № 9891.01.00.001) — II режим испытаний (№ рамы боковой 20162)

| Ступни (уровни) нагружения боковой рамы | Амплитуда циклической нагрузки на ступени (P_{ai}), тс (кН) | Число циклов нагружения на ступени (n_i) | Долговечность на данном режиме, при $P = 0,20$. N_p , (циклов) | (n_i / N_i) | Долговечность на данном режиме, при $P = 0,50$. N_p , (циклов) | (n_i / N_i) | Долговечность на данном режиме, при $P = 0,95$. N_p , (циклов) | (n_i / N_i) |
|--|---|--|---|---------------|---|---------------|---|---------------|
| 1 ступень | 25,5 (250,2) | $1,5 \cdot 10^6$ | $16,44 \cdot 10^7$ | 0,009 | $12,91 \cdot 10^7$ | 0,012 | $5,92 \cdot 10^6$ | 0,253 |
| 2 ступень | 27,0 (264,9) | $1,5 \cdot 10^6$ | $12,90 \cdot 10^7$ | 0,011 | $10,31 \cdot 10^7$ | 0,015 | $2,87 \cdot 10^6$ | 0,522 |
| 3 ступень | 28,5 (279,6) | $1,5 \cdot 10^6$ | $11,65 \cdot 10^7$ | 0,012 | $5,96 \cdot 10^6$ | 0,251 | $1,44 \cdot 10^6$ | 1,042 |
| 4 ступень (до разрушения) | 30,0 (294,0) | $4,098 \cdot 10^6$ | $5,82 \cdot 10^6$ | 0,740 | $2,93 \cdot 10^6$ | 1,393 | $6,21 \cdot 10^5$ | 6,599 |
| $(\sum n_i / N_i)a = 0,20 = 0,736$; $(\sum n_i / N_i)a = 0,50 = 1,673$; $(\sum n_i / N_i)a = 0,95 = 8,418$ | | | | | | | | |

ливости боковых рам — от верхней кривой усталости при вероятности неразрушения $P_{(0)} = 0,20$ (рис. 6) до нижней кривой усталости при вероятности неразрушения $P_{(u)} = 0,95$. На рис. 6 приведена также средняя кривая усталости при вероятности неразрушения $P(*) = 0,50$. Левые ветви кривых усталости представлены в вероятностном аспекте. При усталостных испытаниях методом Локати возможно определение только медианы предела выносливости детали (см. рис. 7 и 8).

При выполнении расчетов по методу Локати приняты следующие обозначения:

$P_{(u)}$ и $P_{(0)}$ — вероятность безотказной работы на нижней и верхней границах переходной области соответственно;

P_{ar} — предел выносливости детали на базе $N_0 = 10^7$ циклов;

P_1 — значение силы на начальной (первой) ступени нагружения;

k — номер ступени, на которой происходит разрушение;

n_i — число циклов на i -ой ступени нагружения;

P_k — значение испытательной нагрузки, при которой произошло разрушение детали на последней ступени нагружения;

n_k — число циклов на последней ступени нагружения;

P_{ai} — значение силы на i -ой ступени нагружения;

N_k — число циклов нагружения при разрушении детали;

В табл. 8 и 9 приведены результаты вычисления суммы $\sum n_i / N_i$ — отношение чисел циклов, пройденных боковой рамой на каждой ступени нагружения (n_i), к ресурсу долговечности по кривой усталости на этих же уровнях нагрузки (рис. 6). N_i определялось из корреляционного уравнения кривой усталости (формулы 4 и 7) при различной вероятности неразрушения детали.

На рис. 7 приведены графики зависимости суммы относительных долговечностей ($\sum n_i / N_i$) от соответствующих условным кривым усталости (см. рис. 6) пределов выносливости. Кривые приведены для двух режимов ступенчатого нагружения боковых рам методом Локати.

По полученным графикам определены значения пределов выносливости P_{ar} (0,50), соответствующие $(\sum n_i / N_i) = 1$ (согласно теории линейного суммирования). Искомые значения предела выносливости боковых рам при оценке по I режиму испытаний методом Локати составили величину $P_{ar} = 27,38$ тс (268,32 кН) при $(\sum n_i / N_i) = 1$. При оценке по II режиму испытаний методом Локати искомое значение предела выносливости боковых рам составило величину $P_{ar} = 28,3$ тс (277,34 кН) при $(\sum n_i / N_i) = 1$ — согласно линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений.

По результатам полученных значений $(\sum n_i / N_i)$ при определенной вероятности неразрушения рам боковых (табл. 9) построен график зависимости $[\lg(\sum n_i / N_i) - P_{ar}]$, по которому графически определен предел выносливости детали методом Локати (II режим нагружения). На рис. 8 показан данный график в логарифмических координатах: при $[(\sum n_i / N_i)a = 0,20] =$

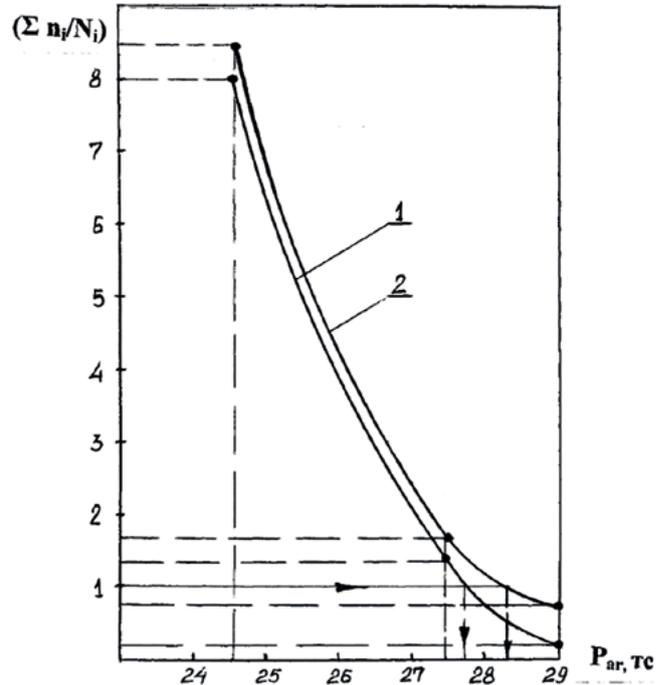


Рис. 7. Графическое определение предела выносливости боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) по результатам испытаний методом Локати: 1 — I режим нагружения; 2 — II режим нагружения

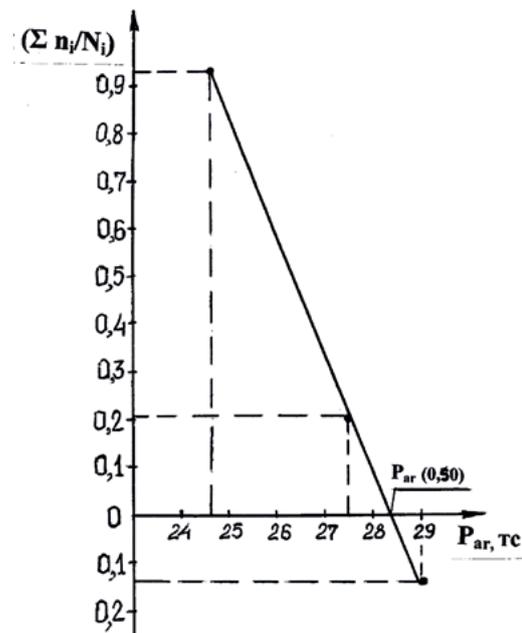


Рис. 8. Графическое определение предела выносливости боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) по результатам испытаний методом Локати (II режим нагружения)

Таблица 10. Результаты сравнительных испытаний боковых рам тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001) по методу Локати и стандартным методом

| Режим испытаний | Обычные испытания | | Ускоренные испытания методом Локати | | | | Коэффициент ускорения |
|-----------------|-------------------------|---|-------------------------------------|---------------------|--|---|-----------------------|
| | Кол-во испытанных б/рам | Предел выносливости, (P_{ar}) , тс (кН) | Кол-во испытанных б/рам | T , тс/цикл | Значение P_{ar} , тс (кН) при $n_i/N_i = 1$ и $p = 0,50$ | Отклонения величин пределов выносливости б/рам, % | |
| См. рис. 3 | 9 | 27,45 (269,0) | | | | | |
| I режим | | | 1 | $0,4 \cdot 10^{-5}$ | 26,0 (254,8) | 5,28 | 15,135 |
| II режим | | | 1 | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | 28,4 (278,32) | 3,34 | 20,404 |

$= 0,736$, $\lg 0,736 = -0,133$, $P_{ar} = 29,1$ тс; при $[(\sum n_i / N_i)a = 0,50] = 1,673$, $\lg 1,673 = 0,221$, $P_{ar} = 27,45$ тс; при $[(\sum n_i / N_i)a = 0,95] = 8,418$, $\lg 8,418 = 0,925$, $P_{ar} = 24,54$ тс. По графику определен предел выносливости боковых рам при вероятности неразрушения $a = 0,50$, при $(\sum n_i / N_i) = 1$, который составил $P_{ar} = 28,4$ тс (278,32 кН).

Сравнительные результаты усталостных испытаний боковых рам, тележки модели 18-9891 (черт. № 9891.01.00.001), испытанных по стандартной методике (9 деталей), и усталостных испытаний методом Локати (1 деталь) приведены в табл. 10.

Уменьшение времени испытаний по методу Локати (коэффициент ускорения) в сравнении со временем испытаний, проводимых обычным методом (полные усталостные испытания боковых рам), определяется по суммарному числу циклов. Результаты сравнений величин предела выносливости, определенных двумя методами (испытания по стандартной методике — 9 деталей и ускоренные усталостные испытания методом Локати — 1 деталь) показывают, что имеет место достаточно хорошее их совпадение. Испытания боковой рамы по I режиму: $P_{ar}(0,50) = 26$ тс (254,8 кН) — методом Локати; $P_{ar} = 27,45$ тс (269,01 кН) — стандартный метод испытаний. Отклонение при этом составило:

$$\Delta = [P_{ar} - P_{ar}(0,50)] / P_{ar} \cdot 100\% = (27,45 - 26,0) / 27,45 \cdot 100\% = 5,28\%.$$

Испытания боковой рамы по II режиму: $P_{ar}(0,50) = 28,4$ тс (278,32 кН) — методом Локати; $P_{ar} = 27,45$ тс (269,01 кН) — стандартный метод испытаний. Отклонение при этом составило:

$$\Delta = [P_{ar} - P_{ar}(0,50)] / P_{ar} \cdot 100\% = (28,4 - 27,45) / 28,4 \cdot 100\% = 3,34\%.$$

Как видно, метод Локати дает достаточно точные результаты, и этим методом можно пользоваться для определения предела выносливости литых рам боковых тележек грузовых вагонов.

Заключение

1. На стадии изготовления опытных боковых рам тележек грузовых вагонов рекомендуется применять ускоренный метод испытаний (метод Локати). Предложенный метод позволяет значительно сократить время и испытательные ресурсы при проведении конструктивно-технологической доводки деталей.

2. При наличии кривой усталости, построенной по результатам длительных испытаний аналогичных конструкций рам боковых, метод Локати применим в качестве контрольного испытания с использованием одного образца натурной детали.

3. Метод Локати можно использовать при обработке новых вариантов боковых рам тележек с технологическими и конструктивными изменениями для определения предела выносливости деталей и коэффициента запаса усталостной прочности в вероятностном аспекте.

4. Отклонения значений предела выносливости, полученных при испытаниях одной детали методом Локати, от величин этого показателя, полученных при испытаниях обычным методом (не менее 9 деталей), колеблются в пределах от 3,3% до 5,3%.

Список источников

1. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний: справочник / Л. М. Школьник. — М.: Металлургия, 1978. — 304 с.

2. Олейник Н. В. Линейная гипотеза усталостных повреждений и ускоренное определение предела выносливости деталей / Н. В. Олейник, П. И. Греченко // Проблемы прочности. — 1989. — № 3. — С. 113–115.

3. Гольд Б. В. Основы прочности и долговечности автомобилей / Б. В. Гольд и др. — М.: Машиностроение, 1967. — 157 с.

4. Рекомендации по ускоренному определению пределов выносливости методом Локати. — М.: ВНИИНМАШ, 1971. — 41 с.

5. РД 50-686—89. Методические указания. Надежность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций.

6. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества.

7. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. — М., 1996. — 317 с.

8. КД. Рама боковая: чертеж № 9891.01.00.001 / ФГБОУ ВО ПГУПС.

9. ГОСТ 15150—69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных клима-

тических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

10. ГОСТ 32400—2013. Рама боковая и балка наддресорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия.

11. ГОСТ 18321—73. Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции.

12. Тележки двухосные грузовых вагонов. Модель 18-9891 с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН) и модель 18-9801 с нагрузкой на ось 23,5 тс (230 кН). Рамы боковые. Программа и методика ускоренных испытаний на усталость методом Локати / ООО «УИЦ-Вагоны». — Нижний Тагил, 2024. — 33 с.

13. Наддресорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методики испытаний на усталость / ОАО «ВНИИЖТ» — ОАО «НИИ вагоностроения». — 2010. — 14 с.

Дата поступления: 03.06.2025

Решение о публикации: 16.07.2025

Контактная информация:

ЧЕРНОВ Владимир Александрович — доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; chernov-nt@mail.ru
ДАНИЛЕНКО Денис Викторович — руководитель департамента; ddv051976@mail.ru

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; tcyganskaya@gmail.com

КОМИЧЕНКО Станислав Олегович — заместитель руководителя; stanislav.komichenko@nvc-vagon.ru

ЕФИМОВ Виктор Петрович — канд. техн. наук, доц., генеральный директор; uiz123456@mail.ru

Accelerated Test Method for the Side Frames of the 18–9891 Model Innovative Bogie

V. A. Chernov¹, D. V. Danilenko², L. V. Tsyganskaya¹, S. O. Komichenko³, V. P. Efimov⁴

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²LLC “RM RAIL Management Company”, 11, Lodygina str., Saransk, 430006, Russian Federation

³JSC “Research and Development Center “Wagons”, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

⁴LLC “UIC – Wagons”, 22, Ordzhonikidze str., of. 28, Nizhny Tagil, 622007, Russian Federation

For citation: Chernov V. A., Danilenko D. V., Tsyganskaya L. V., Komichenko S. O., Efimov V. P. Accelerated Test Method for the Side Frames of the 18-9891 Model Innovative Bogie // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 643–656. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-643-656

Summary

Purpose: To substantiate the selection and experimental development of an accelerated fatigue test of cast load-bearing parts of the 18-9891 Model innovative bogie. **Methods:** The experimental study of the 18-9891-Model bogie side frames with an axle load of 25 tons (245 kN) was conducted using the Locati method. The method under discussion is based on the hypothesis of linear summation of relative fatigue damages occurring during the testing of a full-scale component under conditions of gradually increasing loads over a given period of time. **Results:** The fatigue test results demonstrate that the Locati method is an effective means of ensuring the parameters of the side frame fatigue curve obtained when testing a single sample. The standard fatigue testing procedure for side frames necessitates the testing of nine full-scale components. **Practical significance:** The implementation of a novel accelerated fatigue testing method will lead to substantial reductions in time, materials and testing resources, both during the manufacturing of prototypes and in the mass production of cast load-bearing parts for freight wagons.

Keywords: Load-bearing bogie, side frame, fatigue strength, accelerated test method.

References

1. Shkol'nik L. M. *Metodika ustalostnykh ispytaniy: spravochnik* [Fatigue testing methodology: reference book]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1978, 304 p. (In Russian)
2. Oleynik N. V., Grechenko P. I. Lineynaya gipoteza ustalostnykh povrezhdeniy i uskorennoe opredelenie predela vynoslivosti detaley [Linear hypothesis of fatigue damage and accelerated determination of parts fatigue limit]. *Problemy prochnosti* [Strength problems]. 1989, Iss. 3, pp. 113–115. (In Russian)
3. Gold B. V. et al. *Osnovy prochnosti i dolgovechnosti avtomobiley* [Fundamentals of strength and durability of vehicles]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 157 p. (In Russian)
4. *Rekomendatsii po uskorenному opredeleniyu predelov vynoslivosti metodom Lokati* [Recommendations for accelerated determination of fatigue limits by Lokati method]. Moscow: VNIINMASH Publ., 1971, 41 p. (In Russian)
5. *RD 50-686—89. Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metody uskorennykh ispytaniy na ustalost' dlya otsenki predelov vynoslivosti materialov, elementov mashin i konstruksiy* [RD 50-686—89. Guidelines. Reliability in engineering. Methods of accelerated fatigue tests for assessing fatigue limits of materials, machine elements and structures]. (In Russian)
6. *GOST 33788—2016. Vagoni gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva*

[GOST 33788—2016. Freight and passenger cars. Methods of strength and dynamic quality tests]. (In Russian)

7. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i moderniziruemyykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards for calculation and design of new and modernized railway cars of the MPS gauge 1520 mm (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996, 317 p. (In Russian)

8. *KD. Rama bokovaya: chertezh № 9891.01.00.001* [Side frame: drawing № 9891.01.00.001]. FGBOU VO PGUPS. (In Russian)

9. *GOST 15150—69. Mashiny, pribory i drugie tekhnicheskie izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rayonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktorov vneshney sredy* [GOST 15150—69. Machines, instruments and other technical products. Versions for various climatic regions. Categories, operating conditions, storage and transportation in terms of climatic factors of the external environment]. (In Russian)

10. *GOST 32400—2013. Rama bokovaya i balka nadressornaya litye telezhok zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 32400—2013. Side frame and cast bolster beam of railway freight car bogies. Technical conditions]. (In Russian)

11. *GOST 18321—73. Statisticheskiy kontrol' kachestva. Metody sluchaynogo otbora vybork v shchutchnoy produkcii* [GOST 18321—73. Statistical quality control. Methods of random sampling of piece products]. (In Russian)

12. *Telezhki dvukhosnye gruzovykh vagonov. Model' 18-9891 s nagruzkoy na os' 25 ts (245 kN) i model' 18-9801*

s nagruzkoy na os' 23,5 ts (230 kN). Rama bokovaya. Programma i metodika uskorennykh ispytaniy na ustalost' metodom Lokati [Two-axle freight car bogies. Model 18-9891 with axle load 25 t (245 kN) and model 18-9801 with axle load 23.5 t (230 kN). Side frame. Program and methodology of accelerated fatigue tests by the Lokati method]. Nizhny Tagil: OOO “UITs-Vagony”, 2024, 33 p. (In Russian)

13. *Nadressornye balki i bokovye ramy litye dvukhosnykh telezhok gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Metodiki ispytaniy na ustalost'* [Cast bolster beams and side frames of two-axle freight car bogies with 1520 mm gauge. Fatigue testing methodologies]. OAO “VNIIZhT” — OAO “NII vagonostroeniya”, 2010, 14 p. (In Russian)

Received: June 03, 2025

Accepted: July 16, 2025

Author's information:

Vladimir A. CHERNOV — Associate Professor, Department of Wagons and Wagon Maintenance; chernov-nt@mail.ru

Denis V. DANILENKO — Head of the Department; ddd051976@mail.ru

Lyudmila V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Wagons and Wagon Maintenance; tcyganskaya@gmail.com

Stanislav O. KOMICHENKO — Deputy Head of the Research Center; stanislav.komichenko@nvc-vagon.ru

Viktor P. EFIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor, General Director; uiz123456@mail.ru

УДК 629.463.32

Оценка прочности котла вагона-цистерны при смещении наливного груза

Л. В. Мартыненко¹, А. П. Карбушева¹, Д. П. Кононов²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

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

Для цитирования: Мартыненко Л. В., Карбушева А. П., Кононов Д. П. Оценка прочности котла вагона-цистерны при смещении наливного груза // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 657–666. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-657-666

Аннотация

Цель: Оценка прочности котла вагона-цистерны при перевозке наливного груза. **Методы:** Определено напряженно-деформированное состояние котла вагона-цистерны при перевозке наливных грузов с помощью программного комплекса Femap, который позволяет моделировать поведение виртуальных деталей, узлов и агрегатов систем под воздействием нагрузок и определять их реакцию на заданное воздействие. **Результаты:** Предложена новая методика расчета котла вагона-цистерны с использованием коэффициента интенсивности напряжения, который напрямую зависит от трех составляющих распределения напряженно-деформированного состояния и снижения давления в зоне консольного крепления котла цистерны (опора на лежни) с максимальным давлением. Определен тензор напряжений в месте крепления котла, который зависит не только от особенностей крепления, но и от смещения наливного груза в процессе движения, что может привести к нарушению устойчивости вагона-цистерны. **Практическая значимость:** Расчеты по предложенной методике позволят моделировать реальное поведение котла вагона-цистерны при перевозке наливного груза и показать наглядно картину по распределению и концентрации напряжений в любом узле или детали, что является одной из основных задач при проектировании вагонов.

Ключевые слова: Вагон-цистерна, прочность, напряженно-деформированное состояние, тензор напряжений.

Введение

Цистерна вагона — это специализированный тип железнодорожного вагона, предназначенный для перевозки жидких и газообразных грузов. Она предназначена для транспортировки широкого спектра веществ, включая нефть, нефтепродукты, химикаты, сжиженные газы, пищевые продукты и другие жидкости [1]. Существует множество видов цистерн, предназначенных для перевозки различных грузов. Цистерны могут иметь различный объем, обычно от 50 до

120 м³ [2]. В статье рассмотрен вагон-цистерна модели 15-2169-02. Он подкатывается под двухосную тележку модели 18-9800 и эксплуатируется на магистральных железных дорогах колеи 1520 мм с осевой нагрузкой 245 кН (25 тс).

В процессе движения наливной груз перемещается внутри котла при разгоне и торможении подвижного состава. В результате происходит смещение центра тяжести, что приводит к ухудшению управляемости и возникновению дополнительных напряжений в котле [3–7]. В настоя-

щее время существует возможность расчета котла вагона-цистерны в различных программных комплексах. Результаты расчета могут показать наглядно картину по распределению и концентрации напряжений в любом узле или детали, что является одной из основных задач при обеспечении безопасности движения. В данной работе использовался программный комплекс Femap, позволяющий моделировать поведение виртуальных деталей, узлов и агрегатов систем под воздействием нагрузок и определять их реакцию на заданное воздействие [8, 9].

1. Моделирование конечно-элементной модели котла цистерны

Перед тем как проводить расчеты, необходимо создать конечно-элементную модель котла вагона. Для этого во вкладке Geometry → point... программы Femap задаются координаты точек, необходимые для построения модели. Достаточно использовать координаты 9 точек (таблица).

Для получения геометрического контура данные точки соединяются между собой по следующему алгоритму: Geometry → Curve-Spline → Project Points... → Methods → Point. Отмечаются последовательно точки, относящиеся к днищу. Геометрический контур обечайки получается соединением двух точек модели Geometry → Curve-Line → Project Points... → Methods → Point

Координаты для построения модели котла цистерны

| Номер узла | Координаты | |
|------------|------------|---------|
| | x | y |
| 1 | 6,6 | 0 |
| 2 | 6,57444 | 0,38823 |
| 3 | 6,49952 | 0,750 |
| 4 | 6,38033 | 1,06066 |
| 5 | 6,225 | 1,29904 |
| 6 | 6,04411 | 1,44889 |
| 7 | 5,850 | 1,500 |
| 8 | 5,750 | 1,500 |
| 9 | 0 | 1,500 |

прямой линией. Далее производится предварительная разметка геометрической модели: Mesh → Mesh Control → Size Along Curve..., отмечается кривая днища котла → Ok. Задается количество разбиений по длине, равное 16. В результате получается необходимая разметка днища котла для построения сетки элементов. Аналогично размечается цилиндрическая часть котла. Количество элементов на длину принимаем равной 20.

Для дальнейшей работы необходимо получить отражение имеющейся геометрической модели. Для этого в меню зеркального отражения отмечаются все имеющиеся геометрические элементы: Geometry → Reflect → Curve. Получается необходимая геометрическая модель котла цистерны (рис. 1).

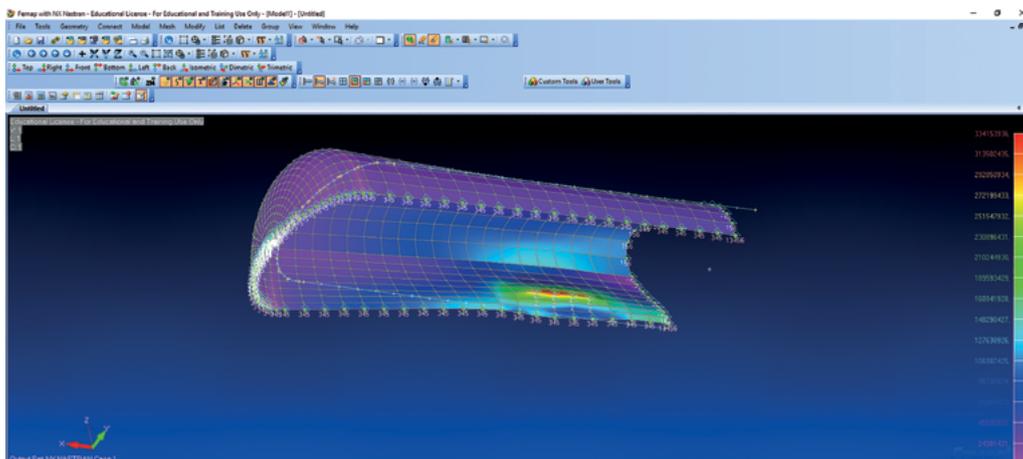


Рис. 1. Геометрическая модель котла цистерны

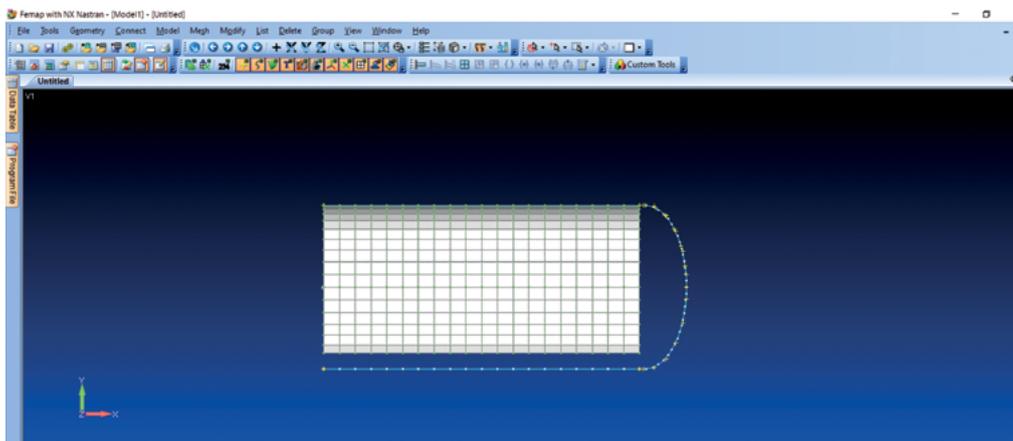


Рис. 2. Боковой и верхний лист цилиндрической части котла

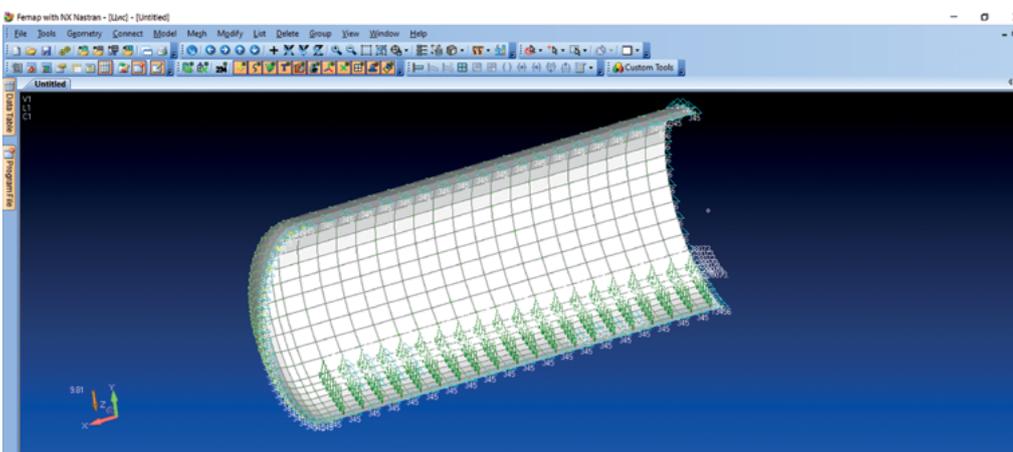


Рис. 3. Нагружение нижней части котла

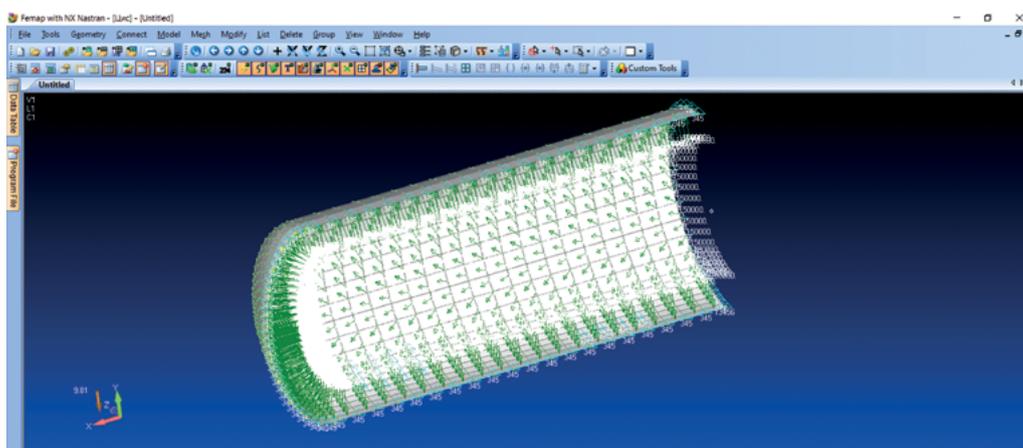


Рис. 4. Объемная нагрузка на модель котла цистерны

Далее, используя геометрическую модель котла, необходимо построить конечно-элементную модель. Начинаем с цилиндрической части. В меню «Вращение» нужно создать новое свой-

ство элемента (пластинчатый), присвоить ему соответствующее название и задать толщину. Так как цилиндрическая часть состоит из набора листов разной толщины (боковой и верхний —

9 мм, нижний — 11 мм), то создавать их нужно по отдельности. В меню «Вращение» Mesh → Revolve → Curve... нужно отметить верхнюю прямую геометрической модели. В результате получим боковой и верхний лист цилиндрической части котла (рис. 2).

Аналогичным образом строится нижний лист цилиндрической части котла.

Далее необходимо создать днище котла. Так как сетка днища котла должна быть связана с сеткой цилиндрической части, то днище нужно моделировать по частям. Отмечаем верхнюю кривую днища котла: Mesh → Revolve → Curve..., отмечаем верхнюю кривую днища котла геометрической модели.

2. Моделирование расчетных нагрузок

Следующим этапом является приложение расчетных нагрузок, действующих на котел вагона-цистерны [10–12]. По первому расчетному режиму на котел действуют: собственный вес конструкции (статический); статическая нагрузка от веса груза; рабочее давление (0,15 МПа). По третьему расчетному режиму на котел действуют: собственный вес конструкции (статический + динамический); нагрузка от веса груза (статическая + динамическая); рабочее давление (0,15 МПа) [13–15]. Для приложения нагрузок необходимо создать сеанс нагружения и присвоить ему название: Model → Load → Create/Manage Set... → New Load Set → Ok (название) → Done.

Затем задается собственный вес ускорения свободного падения: Model → Load → Body... → Active → задать в A_y (-9,81) → Ok. В результате получим нагружение нижнего листа (рис. 3).

Для моделирования рабочего давления, вызванного расширением груза и регулировкой предохранительно-выпускного клапана, отмечаются все элементы модели и задается значение рабочего давления: Model → Load → Element... → Select All → Ok → Pressure (задаем 150 000) → Ok (рис. 4).

3. Расчет напряженно-деформированного состояния котла цистерны

Напряженно-деформированное состояние в месте крепления котла цистерны к раме вагона описывается следующими формулами:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2}\right); \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2}\right); \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}); \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2}; \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \quad (4)$$

где σ_{xx} — нормальные напряжения по оси абсцисс;

K_I — коэффициент интенсивности напряжений;

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (5)$$

r — радиус окружности котла цистерны, м;

θ — угловая координата;

σ_{yy} — нормальные напряжения по оси ординат;

μ — коэффициент Пуассона;

τ_{xy} — касательные напряжения по координате $xу$;

τ_{xz} — касательное напряжение по координате xz ;

τ_{yz} — касательное напряжение по координате yz ;

a — толщина стенки цистерны;

σ — нормальные напряжения в соответствующем направлении.

При $\theta = 0$ (на оси абсцисс), как следует из приведенных соотношений, значения компонент напряжений определяются равенствами:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}}; \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \quad (6)$$

и, следовательно, при $r \rightarrow 0$ (при приближении точки наблюдения к вершине трещины) значения

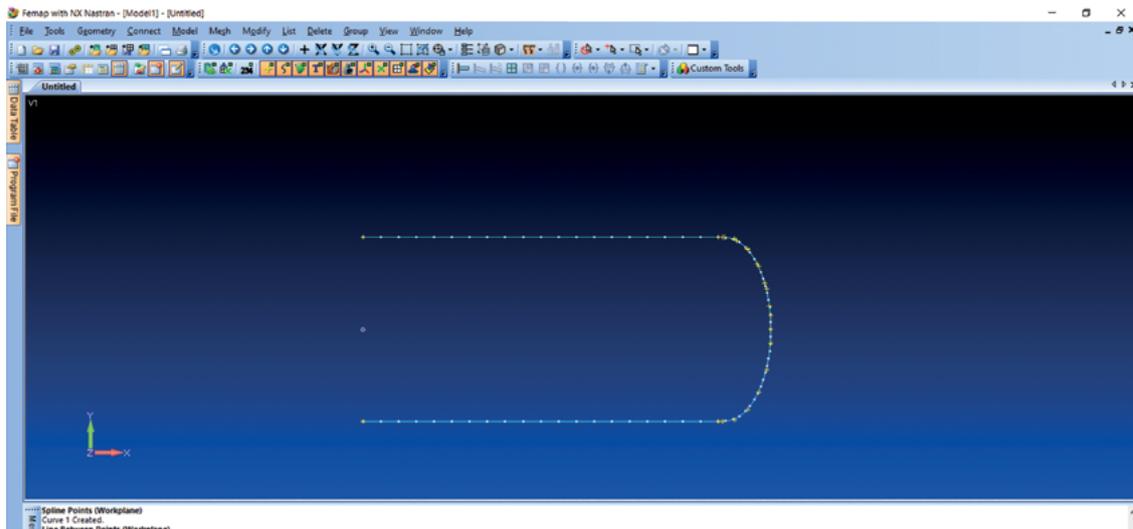


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние котла цистерны по первому расчетному режиму

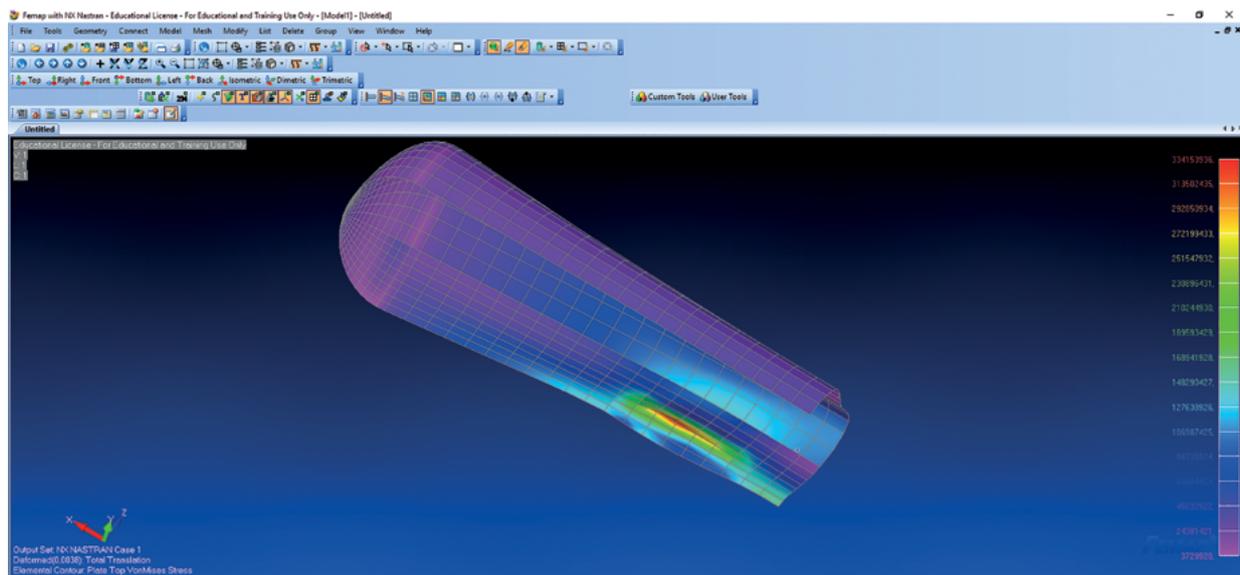


Рис. 6. Третий расчетный режим

нормальных напряжений и напряжения τ_{xy} стремятся к бесконечности, что и объясняет особую опасность появления трещин в элементах конструкций и сооружений. В реальности напряжения в деформируемых деталях и элементах конструкций ограничены и определяются упругопластическими свойствами материала. Можно показать, что для тела произвольной формы формулы (1)–(4) описывают главную часть возникающих в рассматриваемом теле компонент напряжений, отличаясь от них величинами, значения

которых при $r \rightarrow 0$ ограничены по величине. Значения коэффициента K_I определяются в этом случае не формулой (5), а зависят от размеров и формы рассматриваемых деталей и элементов сооружений, а также от уровня внешней нагрузки на них вдали от трещины.

Коэффициент K_I в механике хрупкого разрушения (разрушения деталей, вызванного наличием в них трещин и протекающего, как правило, без развития значительных по размеру зон пластического деформирования) играет особую роль

и называется коэффициентом интенсивности напряжений (КИН). Экспериментальное разрушение таких деталей и элементов показало, что в широком классе задач механики разрушения с приемлемой инженерной точностью предельное (т.е. соответствующее моменту разрушения) значение величины K_I является константой материала и определяет его трещиностойкость. Такое предельное значение обозначается K_{Ic} и существенно зависит от химического состава того или иного сорта стали или сплава металлов, а также от способа их термообработки.

В данной работе при проведении численного анализа НДС и определения коэффициента интенсивности напряжений в котле цистерны рассматриваются два различных случая: первый и третий расчетный режимы.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния котла цистерны по первому расчетному режиму приведены на рис. 5, по третьему расчетному режиму — на рис. 6.

Сопоставление расчетного и теоретического значения величины коэффициента интенсивности напряжений позволяет оценить погрешность осуществленного вычислительного эксперимента. Приведем необходимые для дальнейшего анализа соотношения. Для центральной точки поверхности контакта (в точке $x = 0$), используя соотношение (1), можем записать равенство

$$q_0 = \frac{P}{\pi a}, \quad (7)$$

из которого следует выражение величины P через контактное давление q_0 :

$$P = \pi a q_0, \quad (8)$$

где q_0 — контактное давление, Па;

P — нагрузка, кН.

Подставляя это выражение в равенство (7), получим соотношение

$$q = q_0 \frac{a}{\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad (9)$$

где x — координата центральной точки поверхности контакта.

В точке $x = x_*$ после проведения конечно-элементного расчета величины $q_0^{\text{МКЭ}}$ равенство (4) приближенно может быть записано в виде:

$$q_* = q_0^{\text{МКЭ}} \frac{a}{\sqrt{a^2 - x_*^2}}. \quad (10)$$

Существенно, что величина $q_0^{\text{МКЭ}}$, характеризующая контактное давление вдали от точки сингулярности, может быть определена с высокой степенью точности с помощью конечно-элементного моделирования. Формула (10) с высокой степенью точности дает при этом теоретическое значение величины q_* . Приближенное значение этой величины, обозначаемое далее $q_*^{\text{МКЭ}}$, может быть определено с помощью программного комплекса Femap. Погрешность расчета этой величины ε_1 может быть определена по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{|q_* - q_*^{\text{МКЭ}}|}{q_*}. \quad (11)$$

Заключение

Программное обеспечение комплекса Femap является важным инструментом для определения напряженно-деформированного состояния котла цистерны, который показал, что определение тензора напряжений зависит не только от особенностей крепления котла цистерны, но и от смещения котла цистерны, которое может повлечь за собой нарушение устойчивости вагона-цистерны.

Список источников

1. Гридюшко В. И. Вагонное хозяйство: учебник / В. И. Гридюшко, Н. З. Криворучко, З. П. Бугаев. — М.: Транспорт, 1988.

2. Вагонное хозяйство: учебник / Под ред. П. А. Устича. — М.: Маршрут, 2003.
3. Цыганская Л. В. О причинах деформации обечайки котлов вагонов-цистерн для вязких нефтепродуктов / Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн, Н. А. Атаманчук // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 4. — С. 24–39. — DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39.
4. Григорьев П. С. Оценка устойчивости цилиндрической оболочки котла цистерны с учетом заполнения ее жидким грузом / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, С. Н. Коржин, Ш. Р. Ибодуллоев // Транспорт Урала. — 2021. — № 4(71). — С. 40–45. — DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45.
5. Сурнин А. Ю. Оценка влияния различных факторов на величину остаточных деформаций в котле вагона цистерны при действии статической нагрузки от веса жидкого груза / А. Ю. Сурнин, В. М. Меланин, С. В. Беспалько // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Третьей Международной научно-технической конференции, Ташкент, 17–20 апреля 2024 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2024. — С. 402–411.
6. Сурнин А. Ю. К вопросу о моделировании разрушения котла железнодорожной цистерны ударом дугами безопасности при опрокидывании / А. Ю. Сурнин, С. В. Беспалько // Транспорт Урала. — 2022. — № 4(75). — С. 21–27. — DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-21-27.
7. Громаков М. С. Моделирование поперечных колебаний жидкости в цистерне с применением модельного эксперимента / М. С. Громаков, С. В. Беспалько, Н. А. Корниенко, Л. В. Колокольчикова // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2021. — № 5. — С. 8–15. — DOI: 10.36535/0236-1914-2021-05-2.
8. Григорьев П. С. Оценка устойчивости котла цистерны на основе вариационного принципа Лагранжа / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, С. Н. Коржин // Наука и техника транспорта. — 2022. — № 2. — С. 39–46.
9. Сурнин А. Ю. Моделирование остаточных деформаций котла вагона-цистерны на основе теории ползучести / А. Ю. Сурнин, С. В. Беспалько // Транспортное машиностроение. — 2023. — № 7(19). — С. 66–76. — DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-66-76.
10. Ручкин В. Б. Определение динамической нагруженности котла железнодорожной цистерны с применением специализированных конечных элементов / В. Б. Ручкин, Н. А. Корниенко, С. В. Беспалько // Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года. — М.: Российский университет транспорта, 2023. — С. 637–643. — DOI: 10.30932/9785002182794-2023-637-643.
11. Григорьев П. С. Вариант представления разрешающего уравнения полубезмоментной теории круговых цилиндрических оболочек в форме Доннелла для расчетов напряженного состояния и устойчивости котлов вагонов-цистерн / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, Н. С. Кодиров // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Второй Международной научно-технической конференции, Ташкент, 19–22 апреля 2023 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2023. — С. 114–119.
12. Цыганская Л. В. Выбор схем нагружения для испытаний длиннобазного подвижного состава / Л. В. Цыганская, А. Н. Смирнов, Н. А. Атаманчук и др. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. — С. 222–223.
13. Оценка сил давления жидкости на боковую стенку котла цистерны при поперечных колебаниях кузова / М. С. Громаков, С. В. Беспалько, О. И. Мироненко, А. В. Зяблов // Наука и техника транспорта. — 2021. — № 3. — С. 10–13. — DOI: 10.53883/20749325_2021_03_10.
14. Григорьев П. С. Определение продольной силы, действующей на оболочку котла безрамной цистерны при

столкновении с жестким препятствием / П. С. Григорьев, С. В. Беспалько, С. Н. Коржин, Ш. Р. Ибодуллоев // Наука и техника транспорта. — 2023. — № 4. — С. 69–75.

15. Зяблов Д. В. Определение нагруженности котла цистерны при пожаре с учетом геометрической нелинейности / Д. В. Зяблов, С. В. Беспалько // Транспортное машиностроение. — 2024. — № 1(25). — С. 44–52. — DOI: 10.30987/2782-5957-2024-1-44-52.

Дата поступления: 02.07.2025

Решение о публикации: 10.08.2025

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Любовь Викторовна — старший преподаватель; liuba.martinenko@yandex.ru

КАРБУШЕВА Арина Павловна — студент; karbusheva.arina@mail.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, проф.; d_kononov@mail.ru

Assessing the Tank Car Boiler's Strength in the Event of Liquid Cargo Displacement

L. V. Martynenko¹, A. P. Karbusheva¹, D. P. Kononov²

¹Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Martynenko L. V., Karbusheva A. P., Kononov D. P. Assessing the Tank Car Boiler's Strength in the Event of Liquid Cargo Displacement // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 657–666. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-657-666

Summary

Purpose: To evaluate the strength of the tank car boiler during the transportation of liquid cargo. **Methods:** The Femap software package was used to determine the stress-strain state of the tank car boiler during the transportation of liquid cargo. The simulation of the behavior of virtual parts, components, and systems under loads and the assessment of their response to a given impact was facilitated by this. **Results:** A new method has been created to calculate a tank car boiler using the stress intensity factor. The stress intensity factor is directly dependent on the three components of the stress-strain state distribution and the reduction of pressure in the area of the boiler cantilever fixture (support on the sleepers) with maximum pressure. The stress tensor at the boiler attachment point has been identified. It depends not only on the specific features of the fixture but also on the displacement of the liquid cargo during movement that can lead to tank car instability. **Practical significance:** Calculations based on the proposed methodology will allow simulating the actual behavior of a tank car boiler during the transportation of liquid cargo and provide a clear picture of the distribution and concentration of stresses in any node or part, which is one of the main objectives in the design of tank cars.

Keywords: Tank car, strength, stress-strain state, stress tensor.

References

1. Gridyushko V. I., Krivoruchko N. Z., Bugaev Z. P. *Vagonnoe khozyaystvo* [Carriage stock: textbook]. Moscow: Transport Publ., 1988. (In Russian)

2. Ustich P. A. (Ed.) *Vagonnoe khozyaystvo* [Carriage stock: textbook]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. (In Russian)

3. Tsyganskaya L. V., Beyn D. G., Atamanchuk N. A. O prichinakh deformatsii obechayki kotlov vagonov-tsistern dlya vyazkikh nefteproduktov [On the causes of deformation

of the shell of tanks in tank cars for viscous petroleum products]. *Byulleten' rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2024, Iss. 4, pp. 24–39. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-24-39. (In Russian)

4. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Korzhin S. N., Ibodulloev Sh. R. Otsenka ustoychivosti tsilindricheskoy obolochki kotla tsisterny s uchetom zapolneniya ee zhidkim gruzom [Assessment of the stability of the cylindrical shell of a tank car with consideration of filling it with liquid cargo]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2021, Iss. 4(71), pp. 40–45. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-40-45. (In Russian)

5. Surnin A. Yu., Melanin V. M., Bepalko S. V. Otsenka vliyaniya razlichnykh faktorov na velichinu ostatochnykh deformatsiy v kotle vagona tsisterny pri deystvii staticheskoy nagruzki ot veshi zhidkogo gruzha [Assessment of the influence of various factors on the magnitude of residual deformations in the tank of a tank car under static load from the weight of liquid cargo]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Tret'ey Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii, Tashkent, 17–20 aprelya 2024 goda* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 17–20, 2024]. Tashkent: Tashkentskiy gosudarstvennyy transportnyy universitet Publ., 2024, pp. 402–411. (In Russian)

6. Surnin A. Yu., Bepalko S. V. K voprosu o modelirovanii razrusheniya kotla zheleznodorozhnoy tsisterny udarom dugami bezopasnosti pri oprokidyvanii [On the issue of modeling the destruction of a railway tank car boiler by safety arc impact during capsizing]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2022, Iss. 4(75), pp. 21–27. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-4-21-27. (In Russian)

7. Gromakov M. S., Bepalko S. V., Kornienko N. A., Kolokolchikova L. V. Modelirovanie poperechnykh kolebaniy zhidkosti v tsisterne s primeneniem model'nogo eksperimenta [Modeling of transverse oscillations of liquid in a tank using a model experiment]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, Technology, Management]. 2021, Iss. 5, pp. 8–15. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-05-2. (In Russian)

8. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Korzhin S. N. Otsenka ustoychivosti kotla tsisterny na osnove variatsionnogo printsipa Lagranzha [Assessment of the stability of the tank car shell based on the Lagrange variational principle]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2022, Iss. 2, pp. 39–46. (In Russian)

9. Surnin A. Yu., Bepalko S. V. Modelirovanie ostatochnykh deformatsiy kotla vagona-tsisterny na osnove teorii polzuchosti [Modeling of residual deformations of the tank car shell based on the theory of creep]. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport engineering]. 2023, Iss. 7(19), pp. 66–76. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-66-76. (In Russian)

10. Ruchkin V. B., Kornienko N. A., Bepalko S. V. Opredelenie dinamicheskoy nagruzhennosti kotla zheleznodorozhnoy tsisterny s primeneniem spetsializirovannykh konechnykh elementov [Determination of dynamic loading of a railway tank car shell using specialized finite elements]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 25 maya 2023 goda* [Intelligent transport systems: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 25, 2023]. Moscow: Russian University of Transport Publ., 2023, pp. 637–643. DOI: 10.30932/9785002182794-2023-637-643. (In Russian)

11. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Kodirov N. S. Variant predstavleniya razreshayushchego uravneniya polubezmomentnoy teorii krugovykh tsilindricheskikh obolochek v forme Donnella dlya raschetov napryazhennogo sostoyaniya i ustoychivosti kotlov vagonov-tsistern [Variant of representation of the resolving equation of the semi-moment theory of circular cylindrical shells in Donnell's form for stress-strain analysis and stability calculations of tank car shells]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii, Tashkent, 19–22 aprelya 2023 goda* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 19–22, 2023]. Tashkent: Tashkentskiy gosudarstvennyy transportnyy universitet Publ., 2023, pp. 114–119. (In Russian)

12. Tsyganskaya L. V., Smirnov A. N., Atamanchuk N. A. et al. Vybor skhem nagruzheniya dlya ispytaniy dlinnobaznogo podvizhnogo sostava [Selection of loading schemes for testing long-base rolling stock]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy KhVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–24 avgusta 2023 goda* [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, Saint Petersburg, August 21–24, 2023]. Saint Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2024, pp. 222–223. (In Russian)

13. Gromakov M. S., Bepalko S. V., Mironenko O. I., Zyablov A. V. Otsenka sil davleniya zhidkosti na bokovuyu stenku kotla tsisterny pri poperechnykh kolebaniyakh kuzova [Assessment of fluid pressure forces on the side wall of the tank car shell during transverse body oscillations]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2021, Iss. 3, pp. 10–13. DOI: 10.53883/20749325_2021_03_10. (In Russian)

14. Grigoriev P. S., Bepalko S. V., Korzhin S. N., Ibodulloev Sh. R. Opredelenie prodol'noy sily, deystvuyushchey na obolochku kotla bezramnoy tsisterny pri

stolknovenii s zhestkim prepyatstviem [Determination of longitudinal force acting on the shell of a frameless tank car during collision with a rigid obstacle]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2023, Iss. 4, pp. 69–75. (In Russian)

15. Zyablov D. V., Bepalko S. V. Opredelenie nagruzhennosti kotla tsisterny pri pozhare s uchedom geometricheskoy nelineynosti [Determination of tank car shell loading during fire considering geometric nonlinearity]. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport engineering]. 2024, Iss. 1(25), pp. 44–52. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-1-44-52. (In Russian)

Received: July 02, 2025

Accepted: August 10, 2025

Author's information:

Lyubov' V. MARTYNENKO — Senior Lecturer;
liuba.martinenko@yandex.ru

Arina P. KARBUSHEVA — Student;
karbusheva.arina@mail.ru

Dmitry P. KONONOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; d_kononov@mail.ru

УДК 621.3.076

Векторное управление асинхронным двигателем с оптронным датчиком — формирователем алгоритма

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

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

Для цитирования: Марикин А. Н., Евстафьев А. М., Жемчугов В. Г., Онофрийчук А. Д., Хвостова О. В. Векторное управление асинхронным двигателем с оптронным датчиком — формирователем алгоритма // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 667–675. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-667-675

Аннотация

В статье рассмотрен принцип построения частотного управления асинхронным двигателем с шестиканальным датчиком — формирователем алгоритма. **Цель:** Широкий спектр преимуществ асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором совместно с частотным преобразователем привел к распространённому использованию такого электропривода во многих сферах. При этом характеристики систем автоматического управления частотным преобразователем сложны в технической реализации, а их стоимость значительно превышает стоимость асинхронного двигателя. Предлагаемый способ управления частотным преобразователем, основанный на прямом векторном управлении от оптронного датчика — формирователя алгоритма, позволяет получить широкий диапазон регулирования скоростей электродвигателя при оптимальном соотношении энергетических и механических свойств. Жесткая связь датчика с ротором двигателя задает постоянное скольжение и определяет алгоритм работы ключей инвертора с заданной частотой и положение вектора потокосцепления ротора относительно вектора потокосцепления обмотки статора во всем диапазоне регулирования. **Методы:** Проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке, получены рабочие, механические и регулировочные характеристики. **Результаты:** Было установлено, что зависимость скорости двигателя от напряжения на входе инвертора носит линейный характер, рост момента вызывает снижение скорости двигателя, причем на холостом ходу при отсутствии нагрузки скорость двигателя существенно выше номинального значения. При нагрузке двигателя около 70% от номинального значения скорость, ток и момент соответствуют номинальным значениям, в то время как коэффициент полезного действия оказывается ниже на 15%, чем номинальное значение, за счет потерь в выпрямителе и инверторе и потерь от высших гармоник. **Практическая значимость:** Результаты исследований подтвердили работоспособность предлагаемого способа в широком диапазоне скоростей и нагрузок, имеют значение для оценки применимости способа управления в силовом электроприводе.

Ключевые слова: Асинхронный электропривод, система управления, шестиканальный оптронный датчик — формирователь алгоритма, электромеханические характеристики, экспериментальные исследования.

Известные преимущества асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в сочетании с частотным преобразователем обусловили его широкое применение для различных нагрузок и назначений, требующих широкого диапазона

регулирования скоростей при оптимальном соотношении энергетических и механических свойств, например, в тяговых электроприводах, а также для плавного пуска и остановки промышленных электроприводов (мощных ком-



Рис. 1. Способы частотного управления асинхронным двигателем

прессоров, насосов). Технические требования к системам автоматического управления, сложность технической реализации, стоимость и особенности содержания при эксплуатации определяются их назначением. К настоящему времени разработано и теоретически обосновано широкое разнообразие технических решений в этой области [1–5]. Основные из них показаны на рис. 1.

Предлагаемый способ прямого векторного управления основан на применении оптронного датчика — формирователя алгоритма, жестко соединенного с ротором двигателя. Причем, в отличие от энкодера [6], датчик одновременно выполняет функции задания скольжения, алгоритма работы ключей инвертора с заданной частотой и положения вектора потокосцепления ротора относительно вектора потокосцепления обмотки статора во всем диапазоне регулирования. Преобразование энергии такой системы с учетом обратной связи по ротору можно представить в виде следующей последовательности [7]:

$$U_d \rightarrow \text{АИН} \rightarrow U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow I_1 w_1 \rightarrow \Phi \rightarrow E_2 \rightarrow I_2 \rightarrow I_2 w_2 \rightarrow M_{\text{ЭМ}} \rightarrow n_2(f_2) \rightarrow \text{ДФА} \rightarrow f_1,$$

где U_d — напряжения питания автономного инвертора;

АИН — автономный инвертор напряжения;

U_1 — фазное напряжения двигателя;

I_1 — фазный ток двигателя;

$I_1 w_1$ — намагничивающая сила в обмотке статора;

Φ — основной магнитный поток;

E_2 — ЭДС обмотки ротора;

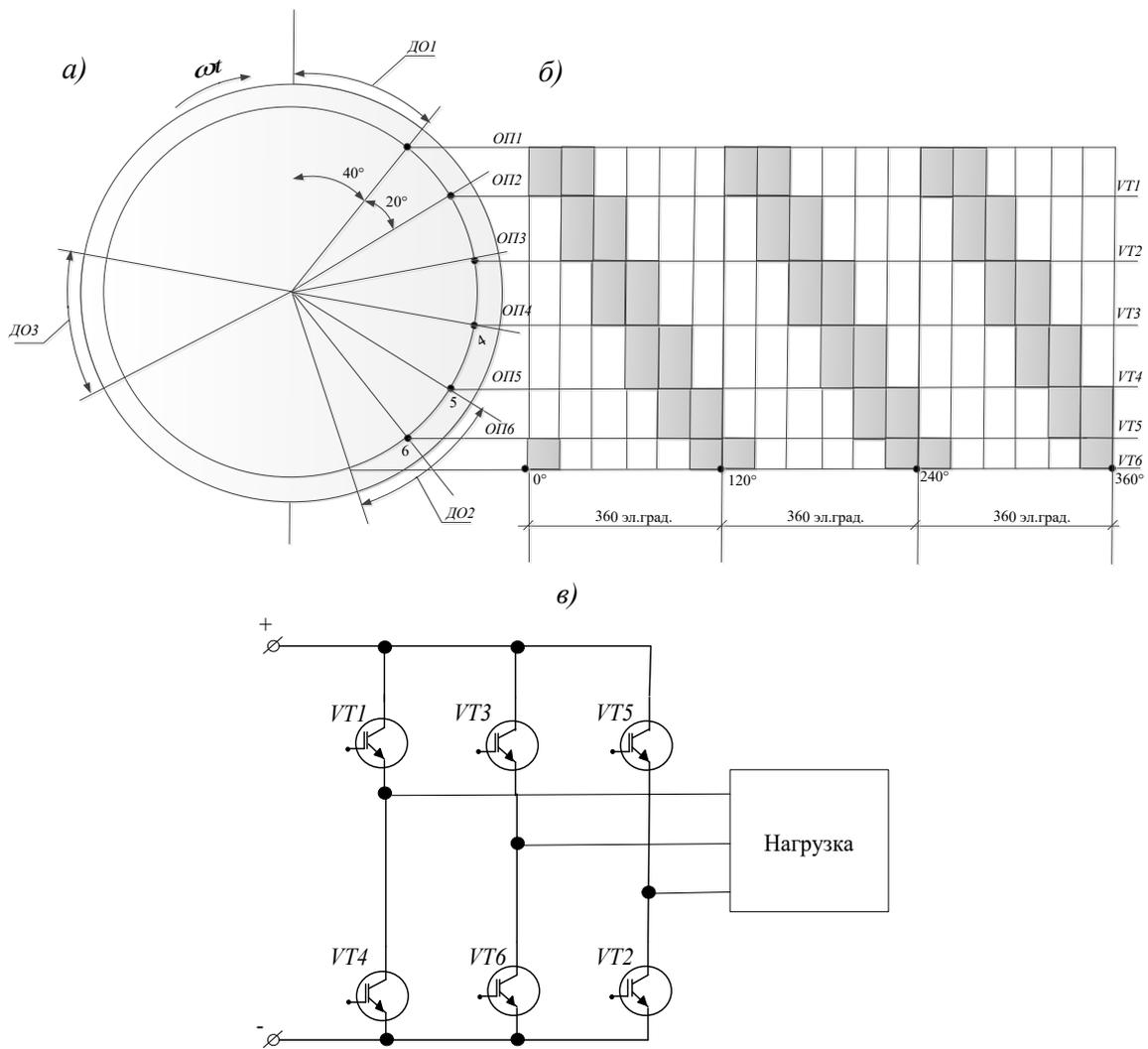


Рис. 2. Формирование алгоритма:

а — конструкция оптронного датчика — формирователя алгоритма; *б* — диаграмма формирования алгоритма управления АИН; *в* — схема силовых цепей АИН

I_2 — ток ротора;

$M_{ЭМ}$ — электромагнитный момент двигателя;

n_2 — скорость вращения ротора;

f_2 — частота тока ротора;

ДФА — датчик — формирователь алгоритма;

f_1 — частота тока статора.

Датчик — формирователь алгоритма представляет собой две неподвижные пластины с оптронами ОП1 — ОП6 (на одной пластине установлен светодиод, на другой — фотодиод). Длительность сигнала обеспечивается дуговыми окнами

ДО1-ДО3. Диаграмма формирования 120-градусного алгоритма управления АИН для шестиполюсной машины изображена на рис. 2 [8–10].

Датчик установлен на валу АД и позволяет реализовать способ подчиненного частотного управления двигателем в широком диапазоне скоростей. Изометрия с разрезом представлена на рис. 3.

Значение скольжения обеспечивается геометрическими характеристиками расположения оптронов и коммутационных окон так, что $f_2 < f_1$, где f_2 — частота тока ротора; f_1 — частота тока статора.

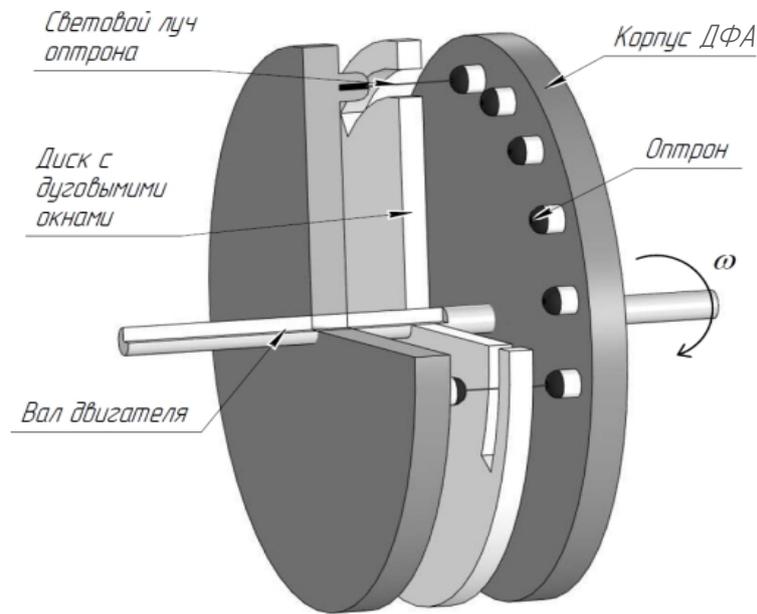


Рис. 3. Изометрия с разрезом оптронного датчика — формирователя алгоритма

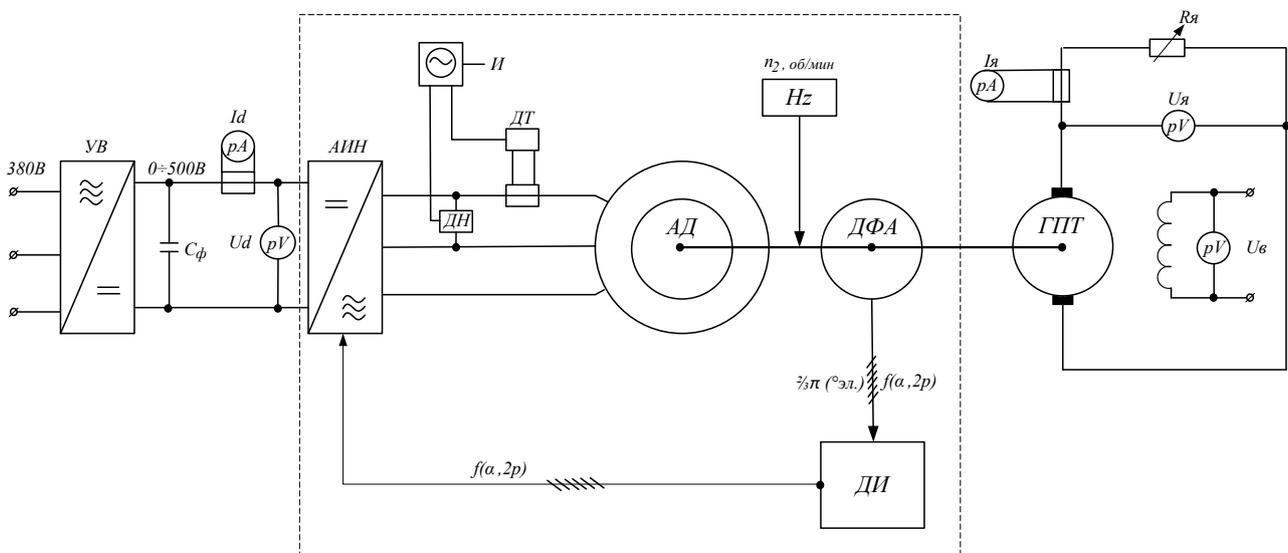


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Исследование механических и регулировочных свойств привода выполнено на экспериментальном образце в лаборатории университета. Схема экспериментальной установки показана на рис. 4.

Питание автономного инвертора (АИН) осуществляется от трехфазного управляемого выпрямителя (УВ). Нагрузка асинхронного двигателя (АД) обеспечивается генератором постоянного тока с независимым возбуждением (ГПТ)

и может варьироваться изменением сопротивления в обмотке якоря ($R_{я}$). Управление автономным инвертором осуществляется через драйвер импульсов (ДИ) с помощью шестиканального датчика — формирователя алгоритма (ДФА).

Общий вид установки изображен на рис. 5. Тип двигателя АИР 56 А4, номинальное напряжение $U_{н} = 220$ В (трехфазное, 50 Гц), $P_2 = 0,12$ кВт, $n_2 = 1350$ об/мин, $I_{н} = 0,76$ А — номинальный ток статора, КПД = 63%, $\cos \varphi = 0,66$.

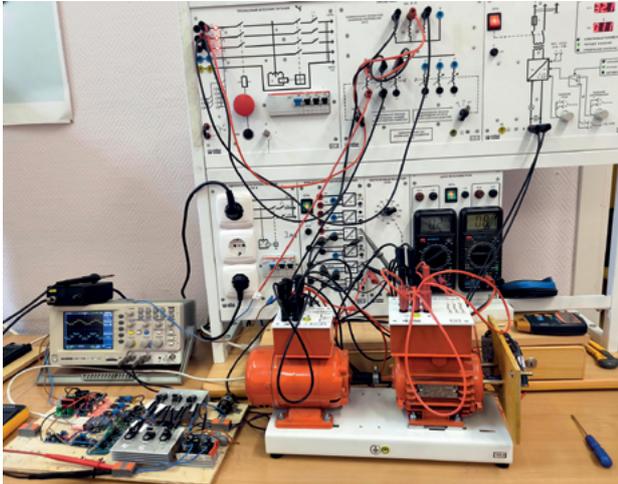


Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки

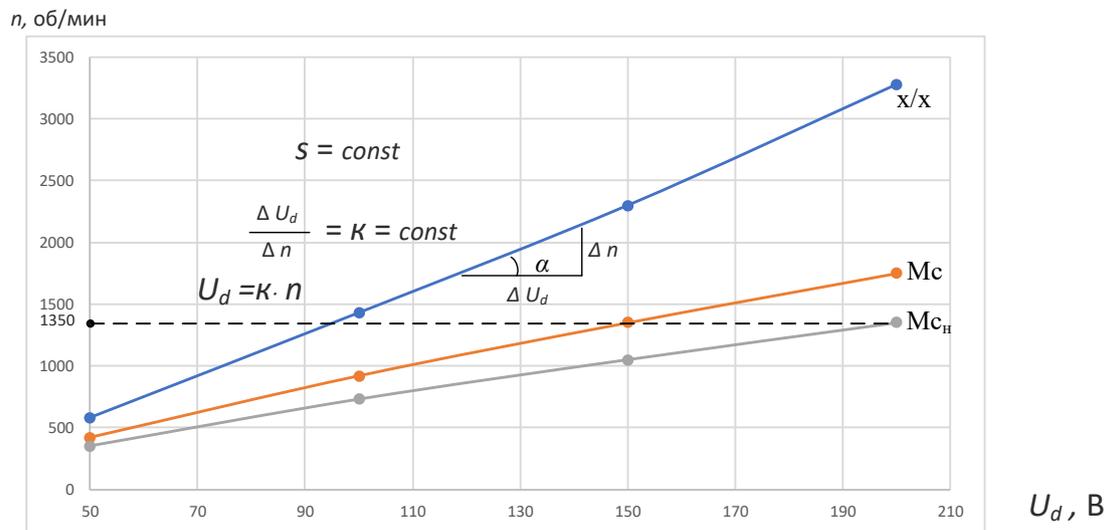
В результате экспериментальных исследований установлено:

1. Регулировочная характеристика (рис. 6, а) зависимости скорости двигателя от напряжения на входе инвертора $n = f(U_d)$ носит линейный

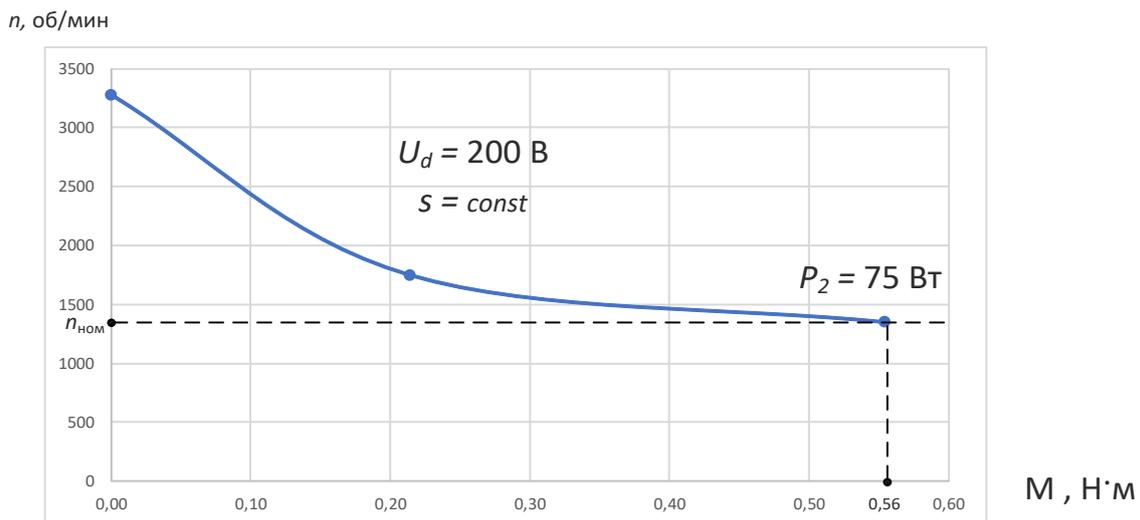
характер, причем отношения $\frac{U_d}{n_1(f_1)} = k = \text{const}$,

где k — угловой коэффициент, зависящий от нагрузки двигателя. Чем больше нагрузка, тем меньше k .

2. Анализ механической характеристики $n = f(M)$, приведенный на рис. 6, б, показывает,



а



б

Рис. 6. Характеристики привода: а — регулировочная, б — механическая

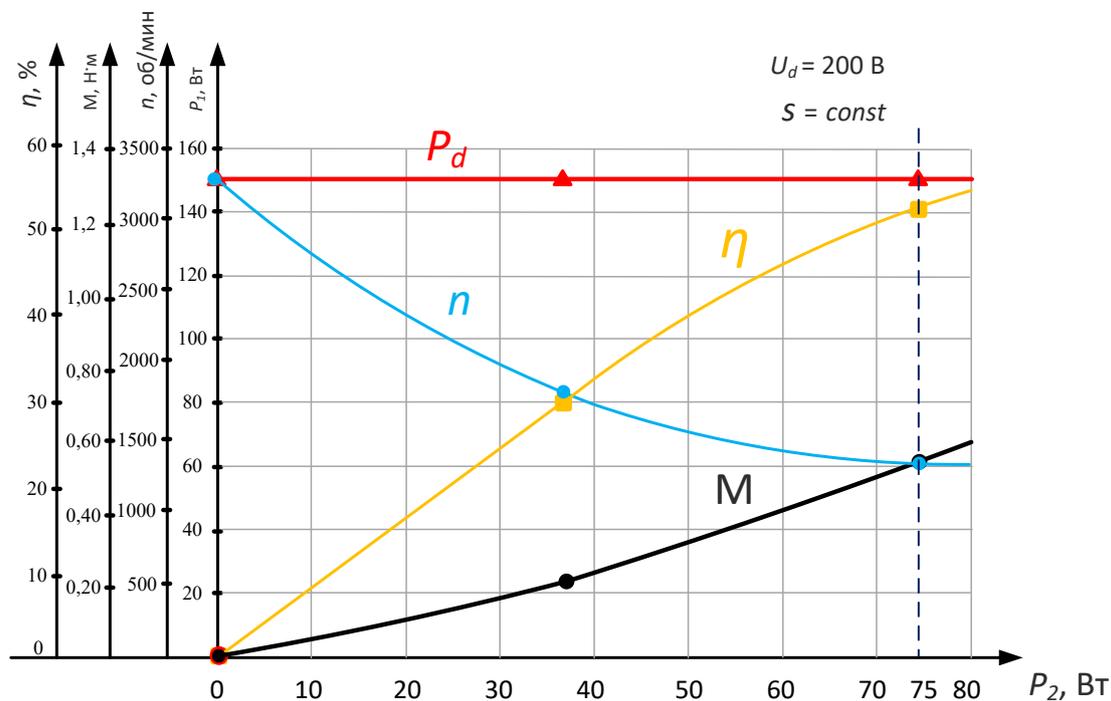


Рис. 7. Рабочие характеристики привода

что с ростом момента скорость двигателя уменьшается, причем на холостом ходу при отсутствии нагрузки скорость двигателя существенно выше номинального значения.

3. На рис. 7 представлены рабочие характеристики зависимостей η (КПД), n, M, I_d в функции от мощности на валу двигателя P_2 . Из характеристик следует, что при нагрузке двигателя около 70% от номинального значения скорость, ток и момент соответствуют номинальным значениям, в то время как коэффициент полезного действия оказывается ниже на 15%, чем номинальное значение, за счет потерь в выпрямителе и инверторе и потерь от высших гармоник.

4. Таким образом, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в сочетании с датчиком — формирователем алгоритма и автономным инвертором позволяет реализовать способ прямого частотного векторного управления, обладающего регулировочными свойствами бесколлекторного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением и короткозамкнутым ротором.

В настоящее время в лабораториях университета проводятся работы по дальнейшему изучению свойств электропривода на более мощных машинах с применением имитационного моделирования для последующего сравнения результатов, а также по разработке рекомендаций по управлению данным способом.

Список источников

1. Феоктистов В. П. Регулируемый электропривод с полной управляемостью дополнительно экономит электроэнергию / В. П. Феоктистов, Ю. Ю. Цыкунов // Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию Московского государственного университета путей сообщения. — М.: МИИТ, 1996. — С. 74–75.
2. Backvalov Y. A. Mathematical modelling of electromechanical processes in electric locomotive / Y. A. Backvalov, P. Kolpachyan et al. // Book of abstracts 16th IMACS World Congress on Scientific Computation and Applied Mathematics and Simulation. — Lausanne: IMACS, 2000. — P. 331.

3. Анучин А. С. Система векторного управления асинхронным электроприводом / А. С. Анучин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы Седьмой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3 т. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — Т. 2. — С. 111.
4. Колпахчян П. Г. Математическая модель электро-механических процессов асинхронного тягового двигателя при питании от инвертора напряжения / П. Г. Колпахчян, А. Г. Никитенко, В. И. Рыжков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 1999. — № 3. — С. 29–32.
5. Хабаров А. И. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с системой управления переменной структуры: дис. ... канд. наук / А. И. Хабаров. — Екатеринбург, 2020. — 159 с.
6. Забровский В. Д. Разработка концепции и опытного образца оптического энкодера на эффекте муара / В. Д. Забровский, А. Г. Дивин, Д. А. Любимова, В. И. Коновалов и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2023. — Т. 29. — № 3. — С. 383–389.
7. Важнов А. И. Электрические машины / А. И. Важнов. — Л.: Энергия, 1968. — 768 с.
8. Марикин А. Н. Устройство для определения углового положения ротора вентильного двигателя: а. с. 1427567 СССР, МКИ Н 03 М 1/26 / А. Н. Марикин, А. Т. Бурков, И. В. Архипова. — 1988. — 5 с.
9. Марикин А. Н. Анализ основных узлов электрооборудования системы частотного регулирования компрессорной станции метрополитена / А. Н. Марикин // Применение полупроводниковой преобразовательной техники в устройствах электрических железных дорог: межвузовский сборник научных трудов. — Л.: ЛИИЖТ, 1985. — С. 25–28.
10. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учебник для вузов железнодорожного транспорта / А. Т. Бурков. — М.: Транспорт, 2001. — 464 с.

Дата поступления: 10.07.2025

Решение о публикации: 18.08.2025

Контактная информация:

МАРИКИН Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф.; marikin_s@mail.ru

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — д-р техн. наук, проф.; evstam@mail.ru

ЖЕМЧУГОВ Валерий Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; zhem@mail.ru

ОНОФРИЙЧУК Андрей Дмитриевич — аспирант; 11isov11@gmail.ru

ХВОСТОВА Олеся Владимировна — ст. преподаватель; hvostol@mail.ru

Vector Control of Asynchronous Motors with an Optronic Sensor Algorithm Generator

A. N. Marikin, A. M. Evstafyev, V. G. Zhemchugov, A. D. Onofriychuk, O. V. Khvostova

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

For citation: Marikin A. N., Evstafyev A. M., Zhemchugov V. G., Onofriychuk A. D., Khvostova O. V. Vector Control of Asynchronous Motors with an Optronic Sensor Algorithm Generator // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 667–675. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-667-675

Summary

The article discusses the principle of constructing frequency control of an asynchronous motor with a six-channel sensor algorithm generator. **Purpose:** The broad spectrum of benefits offered by an asynchronous electric motor equipped with a closed-loop rotor in conjunction with a frequency converter has resulted in the extensive utilisation of such an electric drive in numerous domains. Concurrently, the technical implementation of automatic frequency converter control systems is challenging, and their financial expense greatly exceeds that of an asynchronous motor. The proposed method for controlling a frequency converter, based on direct vector control from an optronic sensor algorithm generator, allows for a wide range of motor speed control with an optimal ratio of energy and mechanical properties. The sensor's rigid connection to the motor rotor establishes a constant slip, thereby dictating the inverter key's operational algorithm, the frequency at which it operates, and the position of the rotor clutch-flow vector relative to the clutch-flow vector of the stator winding across the entire control range. **Methods:** A series of experimental studies have been conducted on a laboratory installation, and operational, mechanical, and control characteristics have been obtained. **Results:** The investigation has revealed a linear relationship between the motor speed and the voltage input to the inverter, whereby an increase in torque resulted in a decrease in motor speed. Additionally, in the absence of load and at idle, the motor speed has been found to exceed the nominal value by a significant margin. At a motor load of approximately 70% of the rated value, the speed, current and torque correspond to the rated values. However, the efficiency is 15% lower than the rated value, due to losses in the rectifier and inverter, and higher harmonics. **Practical significance:** The research has confirmed the operability of the proposed method over a wide range of speeds and loads, and it will be important for evaluating the applicability of the control method in a power electric drive.

Keywords: Asynchronous electric drive, control system, six-channel sensor algorithm generator, electromechanical characteristics, experimental research.

References

1. Feoktistov V. P., Tsykunov Yu. Yu. Reguliruemyy elektroprivod s polnoy upravlyaemost'yu dopolnitel'no ekonomit elektroenergiyu [Controllable electric drive with full controllability additionally saves electricity]. *Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Abstracts of reports of the IV International Scientific and Technical Conference dedicated to

the 100th anniversary of the Moscow State Transport University]. Moscow: MIIT Publ., 1996, pp. 74–75. (In Russian)

2. Backvalov Y. A., Kolpachyan P. et al. Mathematical modelling of electromechanical processes in electric locomotive. Book of abstracts 16th IMACS World Congress on Scientific Computation and Applied Mathematics and Simulation. Lausanne: IMACS, 2000, p. 331.

3. Anuchin A. S. Sistema vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom [Vector control system for

asynchronous electric drive]. *Radioelektronika, Elektrotehnika i Energetika: materialy Sed'moy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Radioelectronics, Electrical Engineering and Power Engineering: Proceedings of the Seventh International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates]. Moscow: MEI Publ., 2001, vol. 2, p. 111. (In Russian)

4. Kolkpakhchyan P. G., Nikitenko A. G., Ryzhkov V. I. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskikh protsessov asinkhronnogo tyagovogo dvigatelya pri pitanii ot invertora napryazheniya [Mathematical model of electromechanical processes of an asynchronous traction motor when powered by a voltage inverter]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics]. 1999, Iss. 3, pp. 29–32. (In Russian)

5. Khabarov A. I. *Asinkhronnyy chastotno-reguliruemyy elektroprivod s sistemoy upravleniya peremennoy struktury: dis. ... kand. nauk* [Asynchronous frequency-controlled electric drive with a variable structure control system: PhD thesis]. Ekaterinburg, 2020, 159 p. (In Russian)

6. Zabrovskiy V. D., Divin A. G., Lyubimova D. A., Konovalov V. I. et al. Razrabotka kontseptsii i opytnogo obraztsa opticheskogo enkodera na effekte muara [Development of the concept and prototype of an optical encoder based on the moire effect]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2023, vol. 29, Iss. 3, pp. 383–389. (In Russian)

7. Vazhnov A. I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1968, 768 p. (In Russian)

8. Marikin A. N., Burkov A. T., Arkhipova I. V. *Ustroystvo dlya opredeleniya uglovogo polozheniya rotora*

ventil'nogo dvigatelya: a. s. 1427567 SSSR, MKI N 03 M 1/26 [Device for determining the angular position of the rotor of a commutator motor: a.s. 1427567 USSR, MKI N 03 M 1/26]. 1988, 5 p. (In Russian)

9. Marikin A. N. Analiz osnovnykh uzlov elektrooborudovaniya sistemy chastotnogo regulirovaniya kompressornoy stantsii metropolitena [Analysis of the main components of electrical equipment of the frequency control system of the metro compressor station]. *Primenenie poluprovodnikovoy preobrazovatel'noy tekhniki v ustroystvakh elektricheskikh zheleznykh dorog* [Application of semiconductor conversion technology in electric railway devices: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov Interuniversity collection of scientific papers]. Leningrad: LIITZhT Publ., 1985, pp. 25–28. (In Russian)

10. Burkov A. T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Electronic engineering and converters: textbook for railway transport universities]. Moscow: Transport Publ., 2001, 464 p. (In Russian)

Received: July 10, 2025

Accepted: August 18, 2025

Author's information:

Alexandr N. MARIKIN — PhD in Engineering, Professor; marikin_s@mail.ru

Andrey M. EVSTAFYEV — PhD in Engineering, Professor; evstam@mail.ru

Valeriy G. ZHEMCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; zhem@mail.ru

Andrey D. ONOFRYICHUK — Postgraduate Student; 11lisov11@gmail.ru

Olesya V. HVOSTOVA — Senior Lecturer; hvostol@mail.ru

УДК 625.111+519.876.5

Интеграция инфраструктуры международных транспортных коридоров «Север — Юг» и Северный морской путь

В. А. Анисимов¹, С. В. Шкурников¹, А. П. Конюхов²

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

²АО «Ленгипротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 143

Для цитирования: Анисимов В. А., Шкурников С. В., Конюхов А. П. Интеграция инфраструктуры международных транспортных коридоров «Север — Юг» и Северный морской путь // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 676–684. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-676-684

Аннотация

Цель: Предложить перспективы развития железнодорожной инфраструктуры Российской Федерации в рамках формирования новой концепции международного транспортного коридора «Север — Юг» в условиях санкционного давления глобального Запада в отношении его стран-участниц. **Методы:** Системный анализ. **Результаты:** Рассмотрена интеграция инфраструктуры международного транспортного коридора «Север — Юг» и Северного морского пути. **Практическая значимость:** Предложены варианты развития железнодорожной инфраструктуры Арктической зоны России для интеграции международного транспортного коридора «Север — Юг» и Северного морского пути с целью повышения логистической маневренности экспортных и импортных перевозок в условиях санкционной политики Запада.

Ключевые слова: Международный транспортный коридор, экспортные и импортные перевозки, геополитика, логистическая маневренность, железнодорожная инфраструктура.

Введение

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации [1] (далее — Стратегия) развитие международных транспортных коридоров (МТК) направлено на создание мультимодальной транспортной инфраструктуры для обеспечения перевозок экспортных и импортных грузов, а также транзита грузов между Европой и странами Центральной, Южной и Восточной Азии. Главными коридорами являются МТК «Запад — Восток» и МТК «Север — Юг», которые должны стать транспортной основой экономической интеграции Евразийского экономического союза (ЕАЭС).

МТК «Север — Юг» включает в себя мультимодальную транспортную инфраструктуру и пересекает большинство широтных торговых маршрутов, проходящих в Евразии. Это делает данный коридор ключевым звеном всей транспортной системы материка и позволяет организовывать новые логистические схемы перевозок грузов между Индией, Китаем, Ираном, странами Африки, Ближнего Востока, Центральной и Южной Азии, Кавказа и Европы [2].

По МТК «Север — Юг» в Стратегии предусмотрено развитие автодорожных и железнодорожных подходов к портам Северо-Западного и Азово-Черноморского бассейнов, Каспийского

моря и к границе с Азербайджаном. К 2030 г. в зависимости от сценария развития прогнозируется увеличение мощности железнодорожных подходов к портам Северо-Западного бассейна до 185–220 млн тонн, к портам Азово-Черноморского бассейна, Каспийского моря и границе с Азербайджаном — до 131–152 млн тонн [1].

МТК «Север — Юг» включает в себя три основных мультимодальных маршрута (рис. 1) [2–8]:

1) западный, проходящий от портов Северо-Западного бассейна по железным дорогам России, Азербайджана, Ирана до порта Бендер-Аббас (Иран) в Ормузском проливе и далее по Аравийскому морю до порта Мумбаи (Индия);

2) восточный, проходящий по железным дорогам России, Казахстана, Узбекистана, Туркмении и Ирана до порта Бендер-Аббас (Иран) и по Аравийскому морю до порта Мумбаи (Индия);

3) транскаспийский, проходящий через каспийские порты России Астрахань, Оля, Махачкала, казахский порт Актау, туркменский порт Туркменбаши, с дальнейшей транспортировкой морским транспортом до северных портов Ирана Амирабад, Ноушехр и Бендер-Энзели, и далее по автомобильным и железным дорогам Ирана до порта Бендер-Аббас.

Проблемы и перспективы

МТК «Север — Юг»

Основной проблемой МТК «Север — Юг» является недостаточная мощность транспортной инфраструктуры Ирана, реконструкция и модернизация которой требует значительных инвестиций. Кроме этого, на участке западного маршрута Астара — Решт, который проходит через горную местность со сложными топографическими и геологическими условиями, необходимо построить новую железную дорогу [2–6, 8].

В настоящее время из-за геополитического конфликта России со странами глобального

Запада коренным образом изменилась логистика экспортных и импортных перевозок, переориентировавшись с западных направлений на восточные и южные [3–10]. По данным ОАО «РЖД», интерес российских грузоотправителей существенно повысился ко всем маршрутам МТК «Север — Юг». Появились новые логистические схемы — экспорт коксующегося угля в Объединенные Арабские Эмираты из Кузбасса, белорусских калийных удобрений в Индию. За 2022–2024 гг. объемы перевозок выросли в среднем на 40–60%, а по некоторым грузам в разы [4–12]. Увеличились перевозки черных металлов из Магнитогорска в Туркменистан и Иран, минеральных удобрений из России и Белоруссии в Индию [4]. В перспективе по МТК «Север — Юг» основными грузами могут стать сельскохозяйственная, металлургическая и химическая продукция, строительные грузы [12].

Изменилась и концепция МТК «Север — Юг». Первоначально он рассматривался в качестве альтернативы морского пути из Европы в Индию через Суэцкий канал. Геополитика внесла свои коррективы. Расширилась география его маршрутов. Кроме стран Кавказа, Персидского залива, Средней и Южной Азии, появились маршруты в страны Африки, Латинской Америки и Азиатско-Тихоокеанского региона АТР [4]. Для выхода на Северный морской путь (СМП) коридор продлили до порта Мурманск [5].

Возможности МТК «Север — Юг» в расширении внешней торговли России и его геополитическое значение трудно переоценить.

К основным преимуществам МТК «Север — Юг» можно отнести [6–16] повышение логистической маневренности для снижения негативного влияния санкционной политики глобального Запада в отношении стран — участниц коридора за счет создания новых транспортных маршрутов экспортных и импортных перевозок, значительное сокращение времени доставки грузов в сравнении с маршрутом через Суэцкий канал, усиление

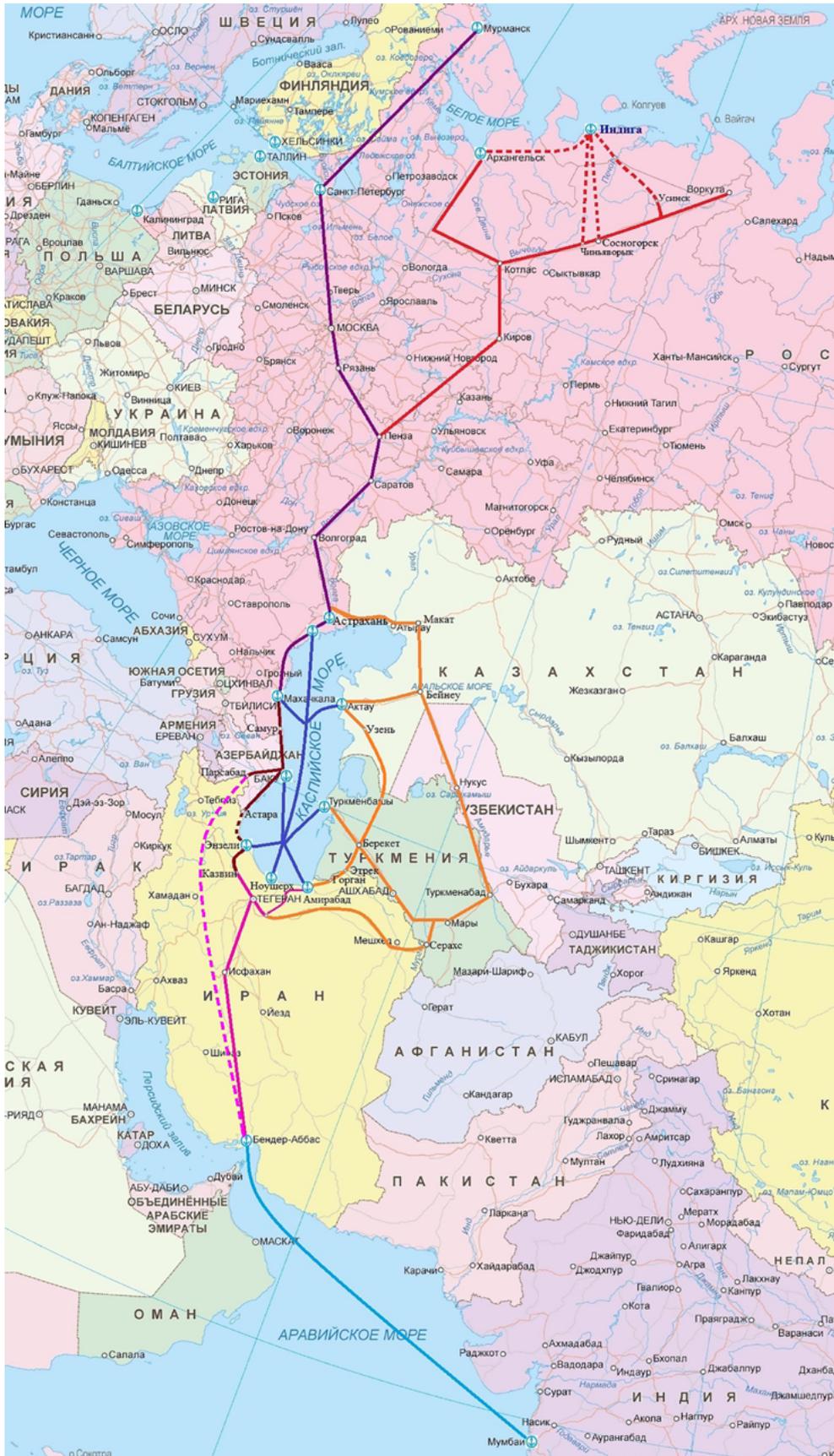


Рис. 1. МТК «Север — Юг» и варианты его развития

евразийской интеграции, снижение транспортных издержек, ускорение социально-экономического развития прилегающих регионов.

Но в то же время не надо забывать про факторы, которые существенно могут тормозить его развитие [6–16]. К ним относятся:

- международные санкции в отношении стран — участниц реализации проекта МТК «Север — Юг»;

- региональные геополитические конфликты между странами — участницами МТК «Север — Юг» (России с Финляндией и странами Прибалтики, Азербайджана с Ираном, конкуренция за геополитическое влияние в Азии между Китаем и Индией [7, 8]);

- конкуренция альтернативных логистических маршрутов, продвигаемых США, Великобританией и Турцией («Лазуритовый коридор», Зангезурский сухопутный транспортный коридор) [7, 8];

- различия технических параметров транспортной инфраструктуры стран — участниц проекта, основное из них — разная ширина колеи железных дорог Ирана и России, а также стран ближнего зарубежья;

- наличие инфраструктурных «барьерных» мест (на западном маршруте отсутствие железной дороги от Астары до Решта, протяженность данного участка составляет 162 км, он предусматривает строительство 8 отдельных пунктов, 56 эстакад, 73 моста, 30 путепроводов [17], на транскаспийском — необходимость проведения дноуглубительных работ для обеспечения проходных глубин до 4,5 м в Волго-Каспийском морском судоходном канале из-за обмеления Каспийского моря, изношенная инфраструктура портов Астрахань и Махачкала);

- таможенные барьеры.

В сложившейся геополитической ситуации для повышения логистической маневренности экспортных и импортных перевозок в условиях

политической и экономической конфронтации России с глобальным Западом приоритетными задачами развития транспортной системы страны должны стать оптимизация существующих и создание новых маршрутов перевозки грузов.

В качестве одного из вариантов оптимизации западного маршрута МТК «Север — Юг» Ирану было предложено построить до порта Бендер-Аббаса отдельную железную дорогу с российской шириной колеи 1520 мм от города Парсабада, расположенного на границе Ирана с Азербайджаном (см. рис. 1). Эта дорога не будет стыковаться с железнодорожной сетью Ирана, позволит сделать коридор бесшовным и обеспечить потребный объем перевозок от 60 до 100 млн тонн в год [18].

По предварительным оценкам группы компаний «Дело», объем инвестиций в данный проект могут составить около € 18,5 млрд. Доходы участников консорциума, реализующих проект, за 40 лет после строительства дороги в виде налоговых поступлений в бюджеты их стран прогнозируются в размере € 20 млрд, дополнительные прямые и косвенные доходы — € 70 млрд [19].

В качестве вариантов создания новых маршрутов с целью повышения логистической маневренности экспортных и импортных перевозок рассматриваются инвестиционные проекты по усилению мощности существующих и строительству новых железнодорожных подходов к российским портам Северного Ледовитого океана для интеграции МТК «Север — Юг» и Северного морского пути (СМП). Данная интеграция МТК «Север — Юг» с СМП и другими широтными международными транспортными коридорами будет способствовать расширению внешней торговли страны, позволит создать в России логистический центр международной торговли со странами разных континентов и стимулировать социально-экономическое развитие регионов, через которые будут проходить данные маршруты.

Одним из вариантов интеграции МТК «Север — Юг» с СМП является строительство железнодорожных подходов к крупнейшему глубоководному (прием судов дедвейтом более 100 тыс. тонн) и круглогодичному порту-хабу Индига с заявленной проектной мощностью 80 млн тонн груза в год. Его проектирование началось в 2019 г. В 2023 г. приступили к его строительству и запустили рейдовый перегрузочный комплекс, в 2024 — началось возведение береговой инфраструктуры и причалов [20]. Сдать первую очередь порта планируется в 2028 г. Прогнозируется увеличение его грузооборота к 2035 г. до 120 млн тонн [21].

Расположение бухты открывает выход в Атлантику по Северному морскому пути, что позволяет организовать морские маршруты в Европу, Северную и Южную Америку, Африку, Азию и обеспечить стратегическую независимость российского экспорта углеводородов, минеральных и лесных ресурсов на международные рынки.

На кафедре «Изыскания и проектирование железных дорог» ПГУПС с 2022 г. ведется реальное дипломное проектирование железнодорожных подходов к порту Индига от существующей железной дороги. Особенности проектирования и строительства железных дорог в суровых арктических условиях привлекают внимание ученых и специалистов и изложены, в частности, в работах [22, 23]. На текущий момент запроектированы возможные варианты по четырем направлениям от станций Архангельск, Чиньяво-рык, Сосногорск и Усинск (см. рис. 1), выполнено их технико-экономическое сравнение. В 2026 г. планируется провести сравнение проектных решений по всем четырем направлениям подходов, используя технико-эксплуатационные и эко-

номические показатели маршрутов перевозок от станции Котлас-Узловая до порта Индига.

Заключение

Транспортная система страны, безусловно, должна обеспечивать обороноспособность и устойчивое экономическое развитие государства независимо от внешнего влияния на него различных геополитических конфликтов. В текущей ситуации, в условиях беспрецедентного санкционного давления на Россию со стороны стран глобального Запада, необходимо формирование новой концепции реализации международных транспортных коридоров, проходящих через территорию нашей страны, которая позволит существенно повысить логистическую маневренность экспортных и импортных перевозок и способствовать расширению внешней торговли со странами разных континентов. С этой целью в статье предложены для новой концепции МТК несколько возможных вариантов развития железнодорожной инфраструктуры Арктической зоны России для интеграции международных транспортных коридоров «Север — Юг» и Северного морского пути.

Список источников

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.
2. Ахунбаев А. Международный транспортный коридор «Север — Юг»: инвестиционные решения и мягкая инфраструктура: доклады и рабочие документы 22/2 / А. Ахунбаев, Е. Винокуров (руководитель авторского коллектива), А. Забоев, Н. Усманов. — Алматы, М.: Евразийский банк развития, 2022. — 84 с.

3. Васильев С. Н. Управление развитием МТК «Север — Юг» как фактор обеспечения безопасности и подтверждения статуса великой державы России в XXI веке / С. Н. Васильев, С. С. Гончаренко // *Транспорт Российской Федерации*. — 2025. — № 4(119). — С. 3–11.
4. Выдащенко Л. А. О некоторых проблемах в реализации международного транспортного коридора «Север — Юг» // *Бюллетень науки и практики*. — 2025. — Т. 11. — № 3. — С. 130–135. — DOI: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/112/16>.
5. Губарева Д. В. Анализ состояния и перспектив развития рынка грузовых железнодорожных перевозок в рамках международного транспортного коридора «Север — Юг» / Д. В. Губарева, К. А. Шаткин // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. — 2024. — № 5–2(92). — С. 160–164. — DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-5-2-160-164>.
6. Малышев М. И. Развитие международного мультимодального коридора «Север — Юг» и меры интеграции региональной транспортной инфраструктуры / М. И. Малышев, Е. Н. Кожанов // *Научный Вестник МГТУ ГА*. — 2024. — Т. 27. — № 1. — С. 28–42. — DOI: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2024-27-1-28-42>.
7. Горбунов А. А. Некоторые вопросы транспортной политики России в условиях западных санкций // *Социальные и гуманитарные знания*. — 2024. — Т. 10. — № 2. — С. 144–151. — DOI: <https://doi.org/10.18255/2412-6519-2024-2-144-151>.
8. Толкачева Е. В. Роль международного транспортного коридора «Север — Юг» в развитии международной торговли Евразийского региона / Е. В. Толкачева, П. И. Лукашук, А. А. Воронов // *Экономика устойчивого развития*. — 2025. — № 1(61). — С. 303–305.
9. Якубук Ю. П. Трансформация международных транспортно-логистических потоков в ЕАЭС в новых геополитических условиях / Ю. П. Якубук // *Актуальные проблемы современного транспорта*. — 2025. — № 1(19). — С. 46–56.
10. Вериго С. А. Международный транспортный коридор «Север — Юг»: проблемы и перспективы / С. А. Вериго, Т. И. Позднякова, А. Б. Кудряшов // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. — 2024. — Т. 14. — № 4А. — С. 492–502.
11. Шумилов М. М. МТК «Север — Юг»: геополитические вызовы и риски. Часть 1 // *Управленческое консультирование*. — 2024. — № 6. — С. 176–195. — DOI: <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2024-6-176-195>.
12. Колесников С. В. Перспективы развития грузовой базы МТК «Север — Юг» / С. В. Колесников, Т. Н. Субботина // *Экономика и управление: проблемы, решения*. — 2024. — № 9. — Т. 15. — С. 75–81. — DOI: <https://doi.org/10.36871/ek.up.r.p.2024.09.15.009>.
13. Ан Г. Н. Проблемы и перспективы МТК «Север — Юг» / Г. Н. Ан, Е. Ю. Баранова // *Молодежь. Наука. Инновации*. — 2024. — Т. 1. — С. 420–424.
14. Рожко А. И. Влияние санкций на развитие транспортной логистики в современной России / А. И. Рожко, М. В. Помогаева, И. Н. Бондаренко, А. В. Бондаренко // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2024. — № 2. — С. 116–122. — DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-116-122>.
15. Джангирия А. В. Изменение принципов международных экономических отношений как фактор развития международного транспортного коридора «Север — Юг» // *Мир транспорта*. — 2024. — Т. 22. — № 2(111). — С. 88–91. — DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-9>.
16. Нечаев А. В. Современные транспортные коридоры России: проблемы и перспективы развития // *Экономические и социально-гуманитарные исследования*. — 2024. — № 4(44). — С. 39–48. — DOI: <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2024-4-39-48>.
17. Россия и Иран запустили изыскательские работы по строительству ж/д линии Решт — Астара. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=222857/> (дата обращения: 15.08.2025).
18. Россия предложила Ирану русскую железную дорогу до Бендер-Аббаса. — URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/rossiya-predlozhila-iranu-russkuyu-zheleznuyu-dorogu-do-bender-abbasa/> (дата обращения: 15.08.2025).

19. Группа «Дело» может стать инвестором строительства дороги «Астара — Бендер-Аббас». — URL: <https://casp-geo.ru/20057-2/> (дата обращения: 15.08.2025).

20. 600 км через тундру: зачем России стройка века на краю Баренцева моря? — URL: <https://finobzor.ru/137391-600-km-cherez-tundru-zachem-rossii-strojka-veka-na-kraju-barenceva-morja.html> (дата обращения: 15.08.2025).

21. Коль О. Д. Развитие проектов транспортно-логистической инфраструктуры в регионах Арктической зоны Российской Федерации в новых геополитических условиях // Вестник факультета управления СПбГЭУ. — 2023. — Вып. 15. — С. 45–57.

Дата поступления: 27.07.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

АНИСИМОВ Владимир Александрович — д-р

техн. наук, доц., проф. кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; anisvl@mail.ru

ШКУРНИКОВ Сергей Васильевич — канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Изыскания и проектирование железных дорог»; 3123810@mail.ru

КОНЮХОВ Алексей Петрович — заместитель главного инженера; apk@lgt.ru

Integration of the International Transport Corridor Infrastructures of the North — South and the Northern Sea Route

V. A. Anisimov¹, S. V. Shkurnikov¹, A. P. Konuhov²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Lengiprotrans, 143, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Anisimov V. A., Shkurnikov S. V., Konuhov A. P. Integration of the International Transport Corridor Infrastructures of the North — South and the Northern Sea Route // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 676–684. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-676-684

Summary

Purpose: To propose prospects for developing the railway infrastructure of the Russian Federation within the framework of a new concept for the international North — South transport corridor. This is particularly important given the sanctions pressure that Western countries are exerting on its members. **Methods:** System analysis. **Results:** The integration of the international transport corridor infrastructure of North — South and the Northern Sea Route has been considered. **Practical significance:** Proposals have been made for the development of the railway infrastructure in the Arctic zone of Russia, with a view to integrating the international North — South transport corridor and the Northern Sea Route. The aim of this integration is to increase the logistical maneuverability of export and import transportation in the context of the sanctions policy of the global West.

Keywords: International transport corridor, export and import transportation, geopolitics, logistical maneuverability, railway infrastructure.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda:*

utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r [Transport Strategy of the Russian Federation through 2030 with a Forecast through

2035: approved by Order of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 № 3363-р].

2. Akhunbaev A., Vinokurov E., Zaboiev A., Usmanov N. *Mezhdunarodnyy transportnyy koridor “Sever — Yug”*: investitsionnye resheniya i myagkaya infrastruktura: doklady i rabochie dokumenty 22/2 [International North-South Transport Corridor: Investment Decisions and Soft Infrastructure: Reports and Working Papers 22/2]. Almaty, Moscow: Evraziyskiy bank razvitiya Publ., 2022, 84 p.

3. Vasil’ev S. N., Goncharenko S. S. Upravlenie razvitiem MTK “Sever — Yug” kak faktor obespecheniya bezopasnosti i podtverzheniya statusa velikoy derzhavy Rossii v XXI veke [Management of the Development of the North-South ITC as a Factor in Ensuring Security and Confirming the Status of a Great Power of Russia in the 21st Century]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2025, Iss. 4(119), pp. 3–11.

4. Vydashenko L. A. O nekotorykh problemakh v realizatsii mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever — Yug” [On Some Problems in the Implementation of the International Transport Corridor “North — South”]. *Byulleten’ nauki i praktiki* [Bulletin of Science and Practice]. 2025, vol. 11, Iss. 3, pp. 130–135. DOI: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/112/16>.

5. Gubareva D. V., Shatkin K. A. Analiz sostoyaniya i perspektiv razvitiya rynka gruzovykh zheleznodorozhnykh perevozok v ramkakh mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever — Yug” [Analysis of the State and Development Prospects of the Rail Freight Market within the International Transport Corridor “North — South”]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences]. 2024, Iss. 5–2(92), pp. 160–164. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-5-2-160-164>.

6. Malyshev M. I., Kozhanov E. N. Razvitie mezhdunarodnogo mul’timodal’nogo koridora “Sever — Yug” i mery integratsii regional’noy transportnoy infrastruktury [Development of the international multimodal corridor “North — South” and measures to integrate regional transport infrastructure]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of Moscow State Technical University

of Civil Aviation]. 2024, vol. 27, Iss. 1, pp. 28–42. DOI: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2024-27-1-28-42>.

7. Gorbunov A. A. Nekotorye voprosy transportnoy politiki Rossii v usloviyakh zapadnykh sanktsiy [Some issues of Russia’s transport policy under Western sanctions]. *Sotsial’nye i gumanitarnye znaniya* [Social and humanitarian knowledge]. 2024, vol. 10, Iss. 2, pp. 144–151. DOI: <https://doi.org/10.18255/2412-6519-2024-2-144-151>.

8. Tolkacheva E. V., Lukashchuk P. I., Voronov A. A. Rol’ mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever — Yug” v razvitiy mezhdunarodnoy trgovli Evraziyskogo regiona [The Role of the International North-South Transport Corridor in the Development of International Trade in the Eurasian Region]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Sustainable Development Economy]. 2025, Iss. 1(61), pp. 303–305.

9. Yakubuk Yu. P. Transformatsiya mezhdunarodnykh transportno-logisticheskikh potokov v EAES v novykh geopoliticheskikh usloviyakh [Transformation of International Transport and Logistics Flows in the EAEU in New Geopolitical Conditions]. *Aktual’nye problemy sovremennogo transporta* [Actual Problems of Modern Transport]. 2025, Iss. 1(19), pp. 46–56.

10. Verigo S. A., Pozdnyakova T. I., Kudryashov A. B. Mezhdunarodnyy transportnyy koridor “Sever — Yug”: problemy i perspektivy [International transport corridor “North — South”: problems and prospects]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economy: yesterday, today, tomorrow]. 2024, vol. 14, Iss. 4A, pp. 492–502.

11. Shumilov M. M. MTK “Sever — Yug”: geopoliticheskie vyzovy i riski. Chast’ 1 [ITC “North — South”: geopolitical challenges and risks. Part 1]. *Upravlencheskoe konsul’tirovanie* [Management consulting]. 2024, Iss. 6, pp. 176–195. DOI: <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2024-6-176-195>.

12. Kolesnikov S. V., Subbotina T. N. Perspektivy razvitiya gruzovoy bazy MTK “Sever — Yug” [Prospects for the development of the cargo base of the North — South ITC]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economics and management: problems, solutions]. 2024, Iss. 9, vol. 15, pp. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.09.15.009>. (In Russian)

13. An G. N., Baranova E. Yu. Problemy i perspektivy MTK “Sever — Yug” [Problems and prospects of the North — South ITC]. *Molodezh'. Nauka. Innovatsii* [Youth. Science. Innovations]. 2024, vol. 1, pp. 420–424. (In Russian)
14. Rozhko A. I., Pomogaeva M. V., Bondarenko I. N., Bondarenko A. V. Vliyanie sanktsiy na razvitiye transportnoy logistiki v sovremennoy Rossii [The impact of sanctions on the development of transport logistics in modern Russia]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology]. 2024, Iss. 2, pp. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-116-122>. (In Russian)
15. Dzhangiryan A. V. Izmenenie printsipov mezhdunarodnykh ekonomicheskikh otnosheniy kak faktor razvitiya mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever — Yug” [Changes in the principles of international economic relations as a factor in the development of the North–South international transport corridor]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2024, vol. 22, Iss. 2(111), pp. 88–91. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-9>. (In Russian)
16. Nechaev A. V. Sovremennye transportnye koridory Rossii: problemy i perspektivy razvitiya [Modern transport corridors of Russia: problems and development prospects]. *Ekonomicheskie i sotsial'no-gumanitarnye issledovaniya* [Economic and socio-humanitarian research]. 2024, Iss. 4(44), pp. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2024-4-39-48>. (In Russian)
17. Rossiya i Iran zapustili izyskatel'skie raboty po stroitel'stvu zh/d linii Resht — Astara [Russia and Iran launched exploration work for the construction of the Resht — Astara railway line]. Available at: <https://doi.org/10.24151/2409-1073-2024-4-39-48> (accessed: August 15, 2025). (In Russian)
18. Rossiya predlozhila Iranu russkuyu zheleznuyu dorogu do Bender — Abbasa [Russia offered Iran a Russian railway to Bender — Abbas]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/rossiya-predlozhila-iranu-russkuyu-zheleznuyu-dorogu-do-bender-abbasa/> (accessed: August 15, 2025). (In Russian)
19. Gruppya “Delo” mozhnet stat' investorom stroitel'stva dorogi “Astara — Bender-Abbas” [The “Delo” Group may become an investor in the construction of the Astara — Bender — Abbas road]. URL: <https://casp-geo.ru/20057-2/> (accessed: August 15, 2025). (In Russian)
20. 600 km cherez tundru: zachem Rossii strojka veka na krayu Barentseva morya? [600 km through the tundra: why does Russia need the construction of the century on the edge of the Barents Sea?]. URL: <https://finobzor.ru/137391-600-km-cherez-tundru-zachem-rossii-strojka-veka-na-kraju-barentseva-morja.html> (accessed: August 15, 2025). (In Russian)
21. Kol' O. D. Razvitiye proektov transportno-logisticheskoy infrastruktury v regionakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii v novykh geopoliticheskikh usloviyakh [Development of transport and logistics infrastructure projects in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation in new geopolitical conditions]. *Vestnik fakul'teta upravleniya SPbGEU* [Bulletin of the Faculty of Management of SPbGEU]. 2023, Iss. 15, pp. 45–57. (In Russian)
22. Bogomolova N., Milyushkan Y., Shkurnikov S., Bushuev N. et al. Features of Engineering Surveys in Areas of Permafrost Prevalence by the Example of the Project “Northern Latitudinal Way”. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019, Singapore, 2019*, pp. 215–221.
23. Alpysova V. A., Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Shulman D. O. The Impact of Engineering-Geologic Conditions on the Development of Railway Subgrade Design Solutions. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 189, pp. 752–758.

Received: July 27, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Vladimir A. ANISIMOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; anisvl@mail.ru

Sergey V. SHKURNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; 3123810@mail.ru

Aleksey P. KONUHOV — Deputy Chief Engineer of “Lengiprotrans”; apk@lgt.ru

УДК 656.07 + 06

Актуальные направления развития принципов управления транспортной работой припортовых грузовых станций

О. Н. Числов, Н. М. Луганченко, Д. С. Безусов

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

Для цитирования: Числов О. Н., Луганченко Н. М., Безусов Д. С. Актуальные направления развития принципов управления транспортной работой припортовых грузовых станций // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 685–697. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-685-697

Аннотация

Цель: Сформулировать направления развития принципов управления транспортной работой припортовых грузовых станций на основе интеллектуальных алгоритмов, использования аксиомат технологических процессов и обработки массивов данных временных параметров. **Методы:** На основе анализа научных работ в направлении данных исследований применена методологическая база интеллектуальных алгоритмов, авторские модели цифровых аксиомат транспортных процессов припортовых станций, учитываемых при выборе вариантов местной работы. **Результаты:** В статье представлены принципы формирования алгоритмов управления транспортной работой припортовых грузовых станций на основе авторской аксиоматики технологических процессов и выбора эффективных вариантов решения транспортных конфликтов в условиях множества вариантов обслуживания, их оценки и выбора рациональных с применением интеллектуальных методов. Исследованы возможные перспективы адаптации интеллектуальных алгоритмов управления к транспортной работе припортовых грузовых станций с целью выбора эффективных технологических параметров местной работы. **Практическая значимость:** На примере транспортно-технологической схемы станции представлены авторский подход к формированию блок-схем управляющих алгоритмов с учетом возможных вариантов обслуживания, решением вероятных транспортных конфликтов и сокращением временных задержек.

Ключевые слова: Припортовая грузовая станция, параметры транспортной работы, аксиоматика, нейросеть, блок-схемы алгоритмов управления, интеллектуализация, аналитическое моделирование, модельные схемы транспортных конфликтов.

Введение

Современные особенности функционирования отечественного железнодорожного транспорта предъявляют повышенные требования к эффективности управления станционными транспортно-технологическими процессами. Показатели объемов перевозок грузов на полигоне Северо-Кавказской железной дороги — филиала ОАО «РЖД» в адрес припортовых станций и портов Азово-Черноморского бассейна (АЧБ) представлены в табл. 1 [1, 2].

Грузооборот морских портов АЧБ за январь — июнь 2025 г. снизился и составил 123,5 млн т (–11,9% к аналогичному периоду 2024 г.), из них объем перевалки сухих грузов составил 49,9 млн т (–23,4%), наливных грузов — 73,6 млн т (–1,9%). Например, грузооборот порта «Н» составил 80,3 млн т (–6,7%), «ТН» — 12,9 млн т (–1,5%), «Т» — 10,7 млн т (+2,6%), «К» — 5,4 млн т (–49,5%), «Р» — 5,7 млн т (–25,9%) [1, 2].

Важным залогом дальнейшего прогресса железнодорожной транспортной системы АЧБ

Таблица 1. Показатели грузооборота портов АЧБ

| Порт | Грузооборот, млн т/год | | | | | | | | | | |
|------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| «Н» | 125,6 | 127,6 | 131,4 | 143,5 | 140,2 | 142,5 | 141,8 | 142,8 | 147,4 | 161 | 164,8 |
| «Т» | 18,9 | 25,19 | 25,8 | 26,6 | 24,3 | 25,1 | 24,8 | 24,5 | 21,7 | 24,7 | 21,4 |
| «Р» | 12,0 | 13,62 | 15,3 | 16,9 | 17,5 | 17,8 | 17,3 | 17,1 | 16,0 | 16,3 | 8,5 |
| «ТГ» | 2,8 | 2,93 | 2,36 | 1,59 | 1,24 | 1,1 | 2,9 | 2,8 | 1,6 | 2,9 | 1,8 |
| «А» | 7,9 | 8,05 | 7,2 | 10,1 | 12,9 | 10,1 | 10,8 | 10,9 | 9,2 | 10 | 8,1 |
| «К» | 12,3 | 13,7 | 15,4 | 20,4 | 23,3 | 20,9 | 21,9 | 20,2 | 18,6 | 21,4 | 23 |
| «ТМ» | 4,5 | 4,7 | 5,1 | 5,9 | 5,4 | 5,2 | 5,5 | 5,6 | 5,4 | 3,8 | 3,3 |
| «Е» | 4,1 | 3,92 | 4,3 | 4,6 | 4,2 | 3,8 | 4,2 | 4,2 | 3,8 | 4,35 | 5,3 |
| «М» | 4,5 | 3,8 | 3,3 | 3,9 | 4,8 | 4,7 | 5,0 | 4,8 | 4,1 | 3 | 3,2 |

является не только развитие новых логистических цепей доставки грузов и международных транспортных коридоров (МТК), но и реализация проектов развития инфраструктуры согласно поручениям Правительства РФ, направленных на обеспечение пропускной способности участков полигона дороги к портам АЧБ в размере 152 млн т к 2030 г. В новых условиях изменения рынков сбыта и транспортной логистики МТК данные мероприятия востребованы у грузоотправителей. Например, с 2022 г. объем перевозок грузов со станций Северо-Кавказской железной дороги по западному маршруту МТК «Север — Юг» вырос более чем в полтора раза. Организованы услуги по формированию судовых партий на железнодорожной инфраструктуре с последующей перевалкой грузов в портах по прямому варианту «вагон — борт судна», развивается сервис «грузовой экспресс» (за 2024 г. количество вагонов, отправленных в рамках данной услуги, выросло по сравнению с 2023 г. на 30% и составило около 8,4 тыс. ваг.), увеличиваются пропускные способности припортовых транспортных узлов в рамках нацпроекта «Эффективная транспортная система» [2].

Одним из важнейших векторов технологического развития железнодорожной транспортной отрасли нашей страны является ее комплексная цифровизация и интеллектуализация. На сегодня

каждый день в ОАО «РЖД» используется более 600 автоматизированных систем и приложений, и их количество растет [3]. При этом особо сложными являются направления развития интеллектуальных принципов управления транспортной работой на стыке «припортовая станция — порт» при решении задачи обслуживания грузовых фронтов, минимизации транспортных конфликтов в вариантах организации местной работы.

Теоретические основы

В статье рассматриваются направления развития принципов управления транспортной работой припортовых грузовых станций за счет интеллектуальных алгоритмов, использования авторских аксиомат технологических процессов, моделирования транспортных конфликтов, совершенствования принципов обработки массивов данных временных параметров при выборе рациональных вариантов местной работы.

Современным методам цифровизации и интеллектуализации транспортных процессов посвящены работы известных ученых: В. И. и М. В. Колесниковых, Н. Н. Лябаха, В. Д. Верескуна, Э. А. Мамаева, Е. Н. Розенберга, П. В. Куренкова, О. Д. Покровской, Э. К. Лецкого, Д. В. Ефанова, А. Н. Рахмангулова, В. Б. Положишников, О. В. Осокина, С. А. Селиверстова, Я. А. Селиверстова и др. [3–14].

Научной основой развития исследований в данном направлении является применение: теории нечетких множеств (ТНМ), позволяющей учитывать неопределенность и неточность в варьируемых параметрах; рекуррентные нейронные сети (РНС) для обработки последовательности данных и учета временных зависимостей между ними; теория активных систем (ТАС) для моделирования взаимодействия разнородных элементов транспортной системы с учетом активного поведения участников транспортного процесса; аналитическое моделирование, комбинаторные методы и теория вероятностей для прогнозирования транспортных конфликтов; графоаналитическое моделирование для визуализации и анализа транспортных процессов и др.

На начальном этапе моделирования железнодорожные припортовые транспортные системы можно разделить на 3 группы в зависимости от уровня транспортно-технологических составляющих:

1) простые объекты, включающие в себя пути, причалы, парки станций;

2) объекты с варьируемым техническим оснащением, включающие обменные и районные парки, грузовые районы порта, погрузочно-выгрузочные устройства. Данная группа увязывает 1-ю и 2-ю группы (простые и сложные объекты);

3) сложные объекты, представляющие собой разнопланово наполненные инфраструктурные комплексы (припортовые станции, порты).

В настоящей работе представлено развитие авторской методики аксиоматики транспортно-технологических процессов [15] в части исследования, анализа и последующей оптимизации технологии работы инфраструктурных объектов системы «станция — порт» с применением принципов базовой (АМТП-Б) и модернизированной (АМТП-М) аксиоматной модели транспортно-технологических процессов. Аксиоматное моделирование имеет связь с классическим

многоуровневым программированием, а также с применением принципов формирования рекуррентных нейронных сетей (РНС), теории активных систем (ТАС), а также теорией нечетких множеств (ТНМ). Аксиоматная модель может формализовать процесс, связанный с функционированием объектов транспортной инфраструктуры, а также составляющие части ее технологии работы. Совокупность аксиомат, выполняющих массив транспортных задач, поставленных перед объектом управления, представляет собой аксиоматную модель транспортно-технологических процессов (АМТП). Модель, не прошедшая обработку средствами ТНМ, РНС, ТАС, называется базовой (АМТП-Б).

Например, процесс построения базовой аксиоматной модели (АМТП-Б) взаимодействия водного (АТПВТ) и железнодорожного транспорта на примере припортовой станции «Н» представлен на рис. 1 [16]. В рамках моделирования выделены логические группы АМТП станции «Н» и причалов порта, где $\mu(T_i)$, $\mu(GFP_i)$, $\mu(G_i)$, $\mu(V_i)$ — нечеткие множества параметров.

Базовая аксиоматная модель АМТП-Б разбита на 4 составляющие логические группы [16]: 1 — аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов (АСТП: $\{GL1 \leftrightarrow PG1 \leftrightarrow \theta(SU) \leftrightarrow PS \leftrightarrow GFP1\}$); 2 — аксиоматы технологических процессов водного транспорта (АТПВТ: $\{PER \leftrightarrow SH \leftrightarrow DEP\}$); 3 — аксиоматы транспортно-складских процессов (АТСП: $\{\theta(PRM_i) \leftrightarrow DWL \cdot Q_i \leftrightarrow WRH \leftrightarrow \theta(PRM_i)\}$); 4 — аксиоматы технологических процессов погрузочно-разгрузочных машин, задействованных в грузовой работе складов (АПРМ).

Для осуществления перехода от АМТП-Б к АМТП-М применимы методы обработки данных, основанные на принципах РНС, ТАС и ТНМ. Применяя один из вышеперечисленных методов обработки информации транспортного объекта, базовая аксиоматная модель становится

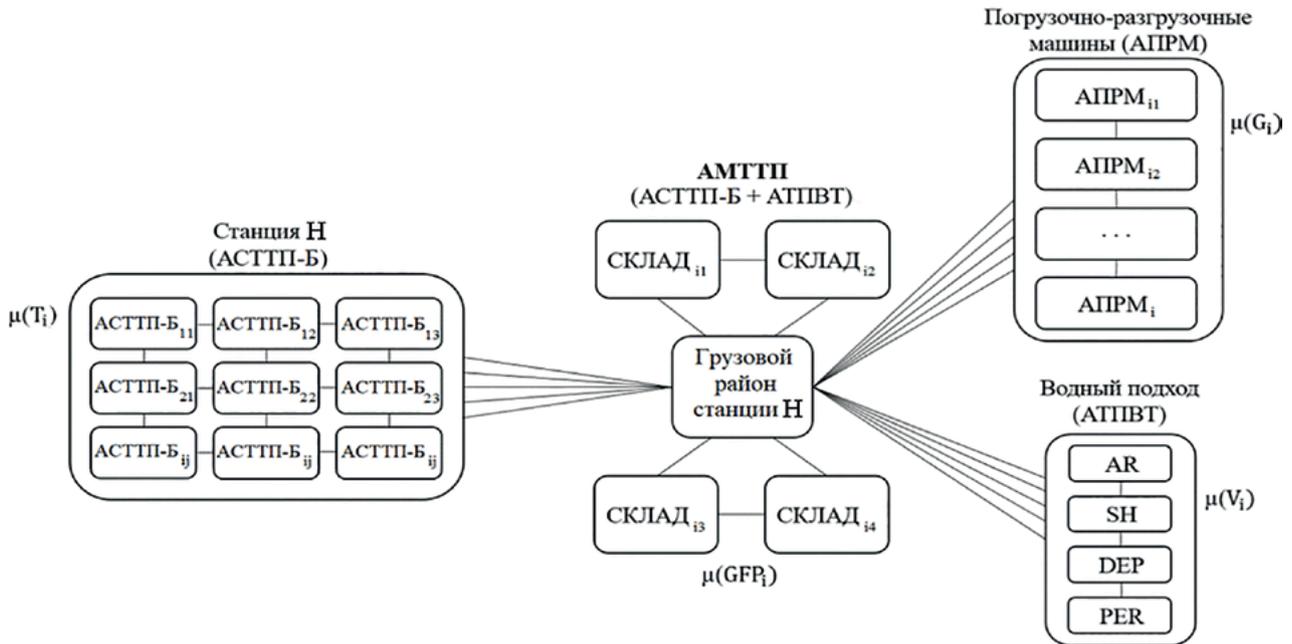


Рис. 1. Логические группы аксиоматной модели взаимодействия водного и железнодорожного транспорта

модернизированной 1-го уровня сложности. При комбинированном применении АМТП-М может принять 2-й или 3-й уровень сложности.

Интерпретируя [17, 18], важно отметить, что РНС способна учитывать предыдущие параметры наблюдения, то есть работать с последовательностью событий транспортных объектов. Известно, что новый временной параметр аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов (АСТТП)_{t+1} по новой модели АМТП-М зависит от нормативного (эталонного) значения аксиомат (АСТТП)_t и прошлых значений аксиомат (АСТТП)_{t-1} по варианту уже выполненной работы — базовой АМТП-Б.

Эти изменения возможно учитывать в моделях управления согласно архитектуре нейронной сети, состоящей из трех слоев параметров времени моделей АМТП, включающих набор значений аксиомат АСТТП: 1 — входной слой X (базовая модель АМТП-Б), 2 — скрытый слой H (нормативные/эталонные значения набора параметров АСТТП по возможным вариантам местной работы станции); 3 — выходной слой Y (модифицированная модель АМТП-М с учетом

новых условий управления транспортной работой и новых времен АСТТП). При этом веса АСТТП и временное смещение между входным (базовым) и скрытым слоями обозначаются как $W(\text{АСТТП})_{xH}$ и $b(\text{АСТТП})_H$ соответственно; веса и смещение между скрытым и выходным (модифицированным/прогнозируемым) слоем как $W(\text{АСТТП})_{HY}$ и $b(\text{АСТТП})_Y$. В архитектуру РНС вводится набор весов установленных (эталонных) параметров времен аксиомат $W(\text{АСТТП})_{HH}$, который позволит учитывать значения предыдущих времен АСТТП при прогнозировании очередного временного значения параметра транспортной работы по варианту управления. Укрупненная архитектура сети представлена на рис. 2.

Процесс моделирования начинается с подачи на вход параметров временных данных АСТТП существующей (базовой) АМТП-Б — $X(\text{АМТП-Б})_{t-1}$, затем значения умножаются на веса входного слоя аксиомат $W(\text{АСТТП})_{xH}$, добавляются временные смещения согласно стратегии управления $b(\text{АСТТП})_H$ и данные пропускаются через функцию активации F . Находятся значения АСТТП скрытого слоя $H(\text{АМТП})_{t-1}$.

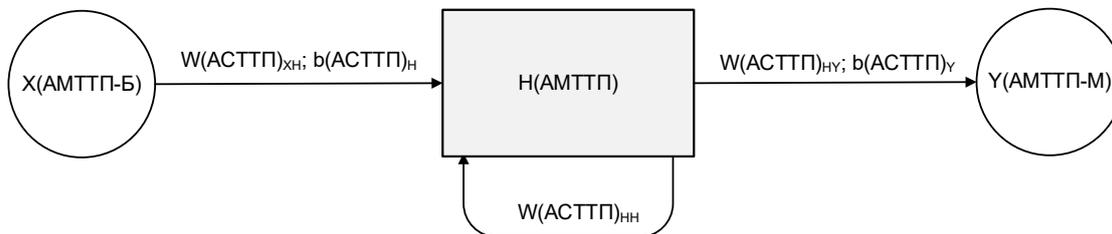


Рис. 2. Архитектура РНС аксиоматного моделирования

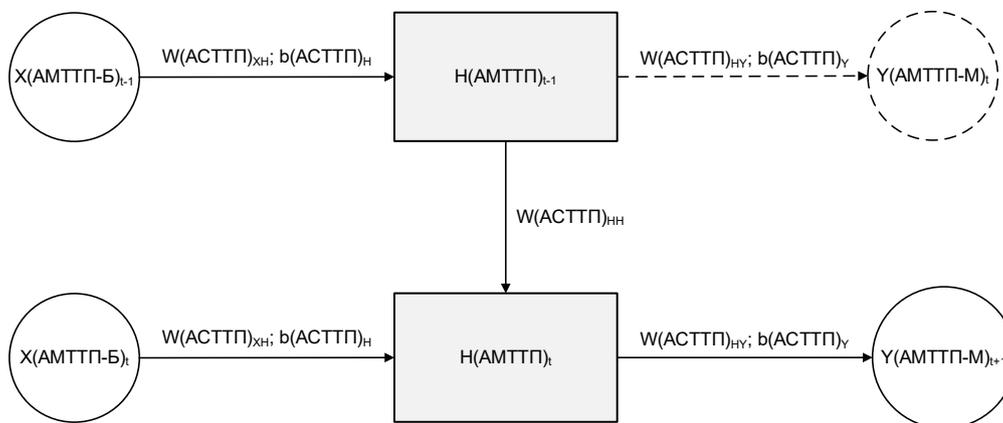


Рис. 3. Развитие архитектуры РНС с аксиоматной «петлей»

Семантика выполняемого процесса имеет вид:

$$H(AMTTP)_{t-1} = F \{ W(ACSTTP)_{XH} \times X(AMTTP-B)_{t-1} + b(ACSTTP)_H \}.$$

Так как АСТТП являются связанными технологическими процессами, то умножая их времена на веса $W(ACSTTP)_{HY}$ и учитывая смещение $b(ACSTTP)_Y$ выходного слоя, получаем существующее первое прогнозные значение $Y(AMTTP)_t$:

$$Y(AMTTP)_t = W(ACSTTP)_{HY} \cdot H(AMTTP)_{t-1} + b(ACSTTP)_Y.$$

Прогноз значений времен модели АМТТП сделан на текущий момент управления, результаты которого могут быть уже известны. Интерес вызывает прогноз значений времен АСТТП по будущим вариантам управления, согласно стратегии технологического развития или изменений местной работы станции.

Для этого одновременно используются временные значения АСТТП на текущий момент

$X(AMTTP-B)_t$ и значение скрытого слоя на предыдущем варианте управления $H(AMTTP)_{t-1}$ в виде:

$$H(AMTTP)_t = F \{ W(ACSTTP)_{XH} \cdot X(AMTTP-B)_t + W(ACSTTP)_{HH} \times H(AMTTP)_{t-1} + b(ACSTTP)_H \}.$$

Далее определяются прогнозные значения аксиомат модели $Y(AMTTP-M)_{t+1}$:

$$Y(AMTTP-M)_{t+1} = W(ACSTTP)_{HY} \times H(AMTTP)_t + b(ACSTTP)_Y.$$

В результате формируется два «экземпляра» аксиоматических архитектур РНС с петлей, позволяя «разворачивать технологический процесс» АСТТП и «обучать» ячейки сети (рис. 3).

Ограничения параметров РНС аксиоматного моделирования:

- 1) параметры $W(ACSTTP)_{XH}$, $b(ACSTTP)_H$, $W(ACSTTP)_{HH}$, $W(ACSTTP)_{HY}$, $b(ACSTTP)_Y$ постоянны для всех шагов — циклов расчета РНС АМТТП;
- 2) количество циклов расчета вариантов нейросетевого управления транспортной работой

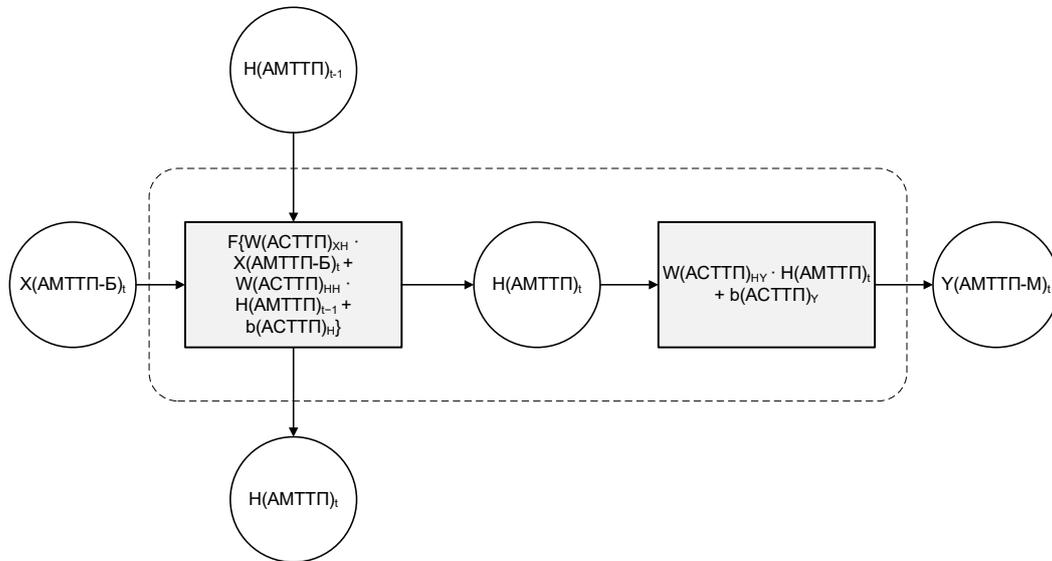


Рис. 4. Схема управления прогнозом РНС АМТПП

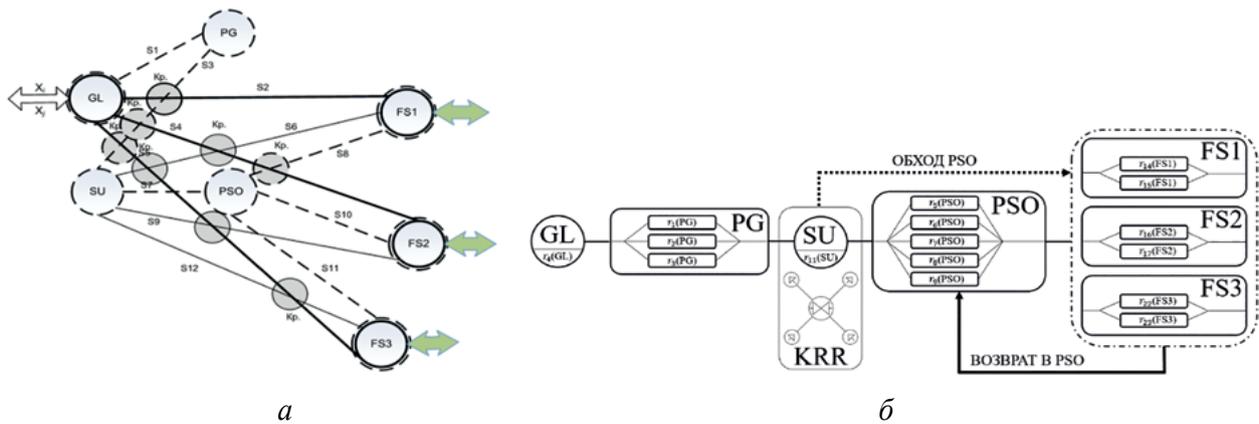


Рис. 5. Интерпретация схемы припортовой железнодорожной станции «Г»:
 а — модельная схема станции; б — аксиоматная схема станции с блоком транспортных конфликтов

станции может быть различным в зависимости от «длины» (количества технологических блоков) аксиоматы;

3) ячейка РНС вариантов аксиоматного управления может выдавать выходное значение $Y(AMTTP-M)_{t+1}$ или быть «∅», в зависимости от того, используется ли конкретная АСТТП из набора вариантов аксиомат прогнозной модифицированной модели АМТПП-М или нет (рис. 4).

В зависимости от того, сколько входов $\forall(X)$ — аксиомат АМТПП-Б и выходов $\forall(Y)$ — аксиомат АМТПП-М «подключаются» в конкретном

прогнозировании варианта управления местной работой станции при одном разворачивании ячеек РНС во времени, возможны различные типы архитектуры РНС АМТПП:

1) «много в один» (*many-to-one*) — «МвО»: из множества аксиомат входа $X(AMTTP-B)$ выбирается одна наиболее рациональная аксиомата выхода $Y(AMTTP-M)$ для данного варианта управления;

2) «один во много» (*one-to-many*) — «ОвМ»: аксиомата входа $X(AMTTP-B)$ в прогнозируемом варианте управления разделяется на несколько аксиомат выхода $Y(AMTTP-M)$;

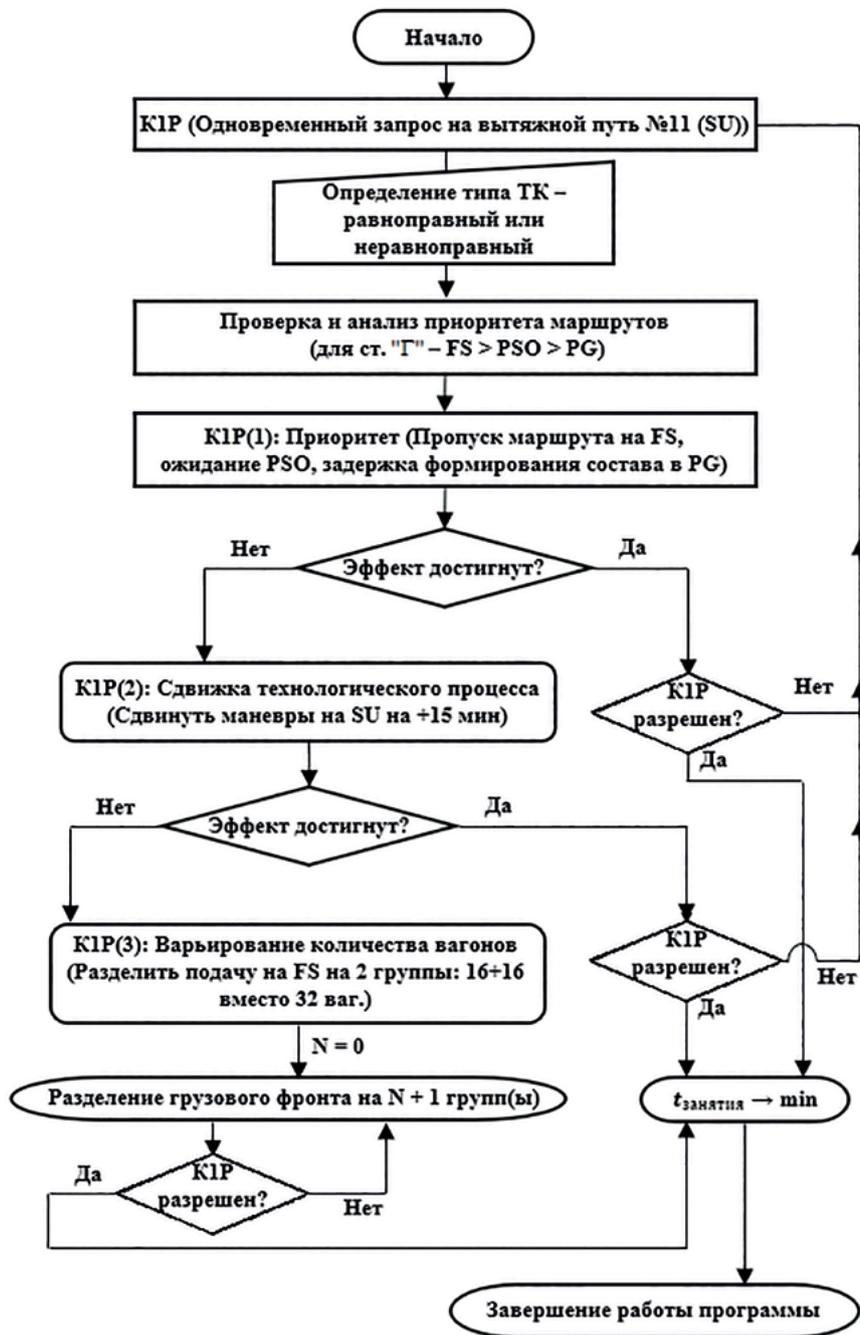


Рис. 6. Блок-схема решения К1Р по варианту транспортной работы припортовой станции «Г»

3) «много во много» (*many-to-many*) — «МвМ»: либо соответствие количества входов и выходов аксиомат $X(\text{АМТТП-Б}) = Y(\text{АМТТП-М})$, либо нет — $X(\text{АМТТП-Б}) \neq Y(\text{АМТТП-М})$.

Примечание: при моделировании АМТТП чаще всего используется архитектура «МвМ».

Моделирование управления транспортными конфликтами в местной работе станции

Важным моментом при выборе вариантов управленческих решений наборами АМТТП является моделирование наиболее проблемных случаев — транспортных конфликтов. Предлагается опреде-

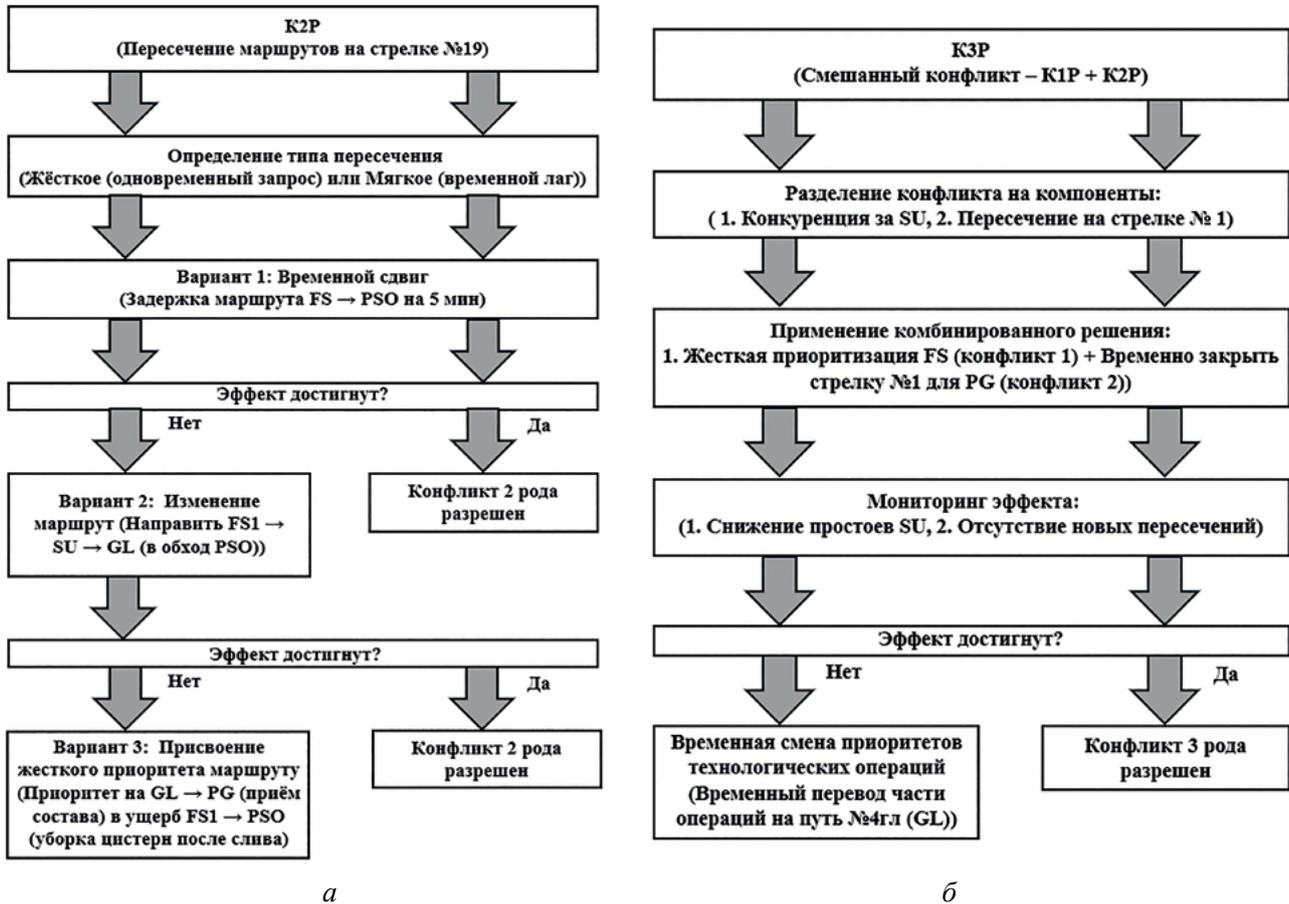


Рис. 7. Укрупненные блок-схемы решения транспортных конфликтов по вариантам управления местной работой станции «Г»: а — К2Р, б — К3Р

лять транспортные конфликты (К): К1Р — первого рода — состояния, при которых множеству транспортных средств (поездов, подач вагонов) в один и тот же момент времени требуется одна и та же АМТП; К2Р — второго рода — состояния, при котором множество транспортных средств (поездов, подач вагонов) использует множество АМТП, имеющих однотипные участки по маршруту движения и точки взаимного одноуровневого пересечения; К3Р — третьего рода — состояния, представляющие собой смешанный конфликт К1Р и К2Р [15, 16].

В качестве примера рассмотрим методологический подход к управлению транспортными конфликтами припортовой железнодорожной станции «Г», варианты интерпретаций схемы которой представлены на рис. 5. Инфраструктурные элементы станции «Г» включают в себя:

однопутный подход главного пути (GL); грузовой парк (PG); сортировочно-отправочный парк (PSO); вытяжной путь (SU); три грузовых фронта необщего пользования (FS); узлы пересечений маршрутов — транспортные конфликты (KRR).

При управлении местной работой станции используются аксиоматы:

$$\{GL \leftrightarrow FS \leftrightarrow PSO\}, \{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow SU \leftrightarrow PSO \leftrightarrow FS1/FS2/FS3 \leftrightarrow PSO\}, \{GL \leftrightarrow PG \leftrightarrow SU \leftrightarrow FS1/FS2/FS3 \leftrightarrow PSO\}.$$

Аналитический расчет одноуровневых конфликтных пересечений выполняется согласно Инструкции по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог [19]. Для идентификации транспортных конфликтов схемы станции согласно методам теории вероятностей и ТНМ были разработаны алгоритмы и специ-

ализированная программа *Axiomatic v.1.0* на языке программирования *Python* [20]. Алгоритмы работы программы предусматривают интерактивное взаимодействие с пользователем через консольный интерфейс, что позволяет оперативно адаптировать аналитические расчеты временных параметров к изменяющимся условиям транспортной работы. На рис. 6, 7 приведены блок-схемы примеров решения К1Р–К3Р по вариантам транспортной работы станции «Г».

Программный комплекс выполняет комплексный анализ оперативной обстановки на станции, запрашивая у пользователя актуальные данные о расположении подвижного состава и нормах выполнения транспортной работы. На основе введенных параметров (количество вагонов в парках и на путях) система: формирует рациональный вариант выполнения технологических операций; сравнивает текущую ситуацию с эталонным («идеальным») вариантом исполнения транспортной работы — аксиомат; проводит детектирование потенциальных конфликтных ситуаций.

Проведенное исследование показало, что наиболее распространенным для станции оказался К1Р, проявляющийся в конкуренции транспортной операцией на вытяжном пути. К2Р, связанный с пересечением поездных и маневровых маршрутов, увеличивает время обработки местного вагона на 15–20%. К3Р проявляется сравнительно редко и связан с несоответствием длины маршрутов вместимости путей приема-отправления.

Выводы и перспективы развития

Таким образом, возможно и целесообразно развитие интеллектуализации и цифровизации управления транспортной работой железнодорожных припортовых станций на основе усовершенствованной аксиоматики транспортно-технологических процессов и нейросетевых моделей для прогнозирования очередности обслуживания грузовых фронтов и решения транспортных конфликтов.

Дальнейшее развитие программного модуля *Axiomatic* связано с добавлением новых функций анализа местной работы, ее планирования и оптимизации с формированием базы больших данных временных и инфраструктурных параметров и их оценки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00869 (<https://rscf.ru/project/24-29-00869/>).

Список источников

1. Transport of Russia: All-Russian transport weekly information and analytical newspaper. URL: <http://www.transportrussia.ru> (дата обращения: 22.05.2025).
2. Северо-Кавказская железная дорога. URL: <http://skzdservice.ru/page/4> (дата обращения: 22.05.2025).
3. Солодкий А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап / А. И. Солодкий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2020. — № 6. — С. 10–19. — DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.
4. Селиверстов С. А. Аксиоматические методы организации транспортно-логистической инфраструктуры / С. А. Селиверстов, Я. А. Селиверстов // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах: Сборник трудов, Санкт-Петербург, 23–25 сентября 2015 г. — СПб.: ПГУПС, 2016. — С. 67–77.
5. Мамаев Э. А. Математическая модель организации эксплуатационной работы в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка / Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2025. — Т. 22. — № 1. — С. 60–74. — DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-60-74.
6. Мировой опыт применения системных решений в области ИТС. URL: <https://dr.rosavtodor.gov.ru/department/deyatelnost-dr/intellektualnye-transportnye-sistemy/mirovoj-opyt-vnedreniya-i-razvitiya-its> (дата обращения: 19.07.2025).
7. Осокин О. В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транс-

порте: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: дис. ... д-ра техн. наук / О. В. Осокин. — Екатеринбург, 2014. — 355 с.

8. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 80–94. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94.

9. Рахмангулов А. Н. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов и др. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 3. — С. 43–59.

10. Chislov O. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes / O. Chislov, N. Lyabakh, M. Kolesnikov, M. Bakalov et al. // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2131. — Iss. 032007. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032007.

11. Положишников В. Б. О применении искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / В. Б. Положишников, В. А. Акманов, С. Н. Томащенко, Т. В. Шипунов // Железнодорожный транспорт. — 2019. — № 3. — С. 33–36.

12. Колесников В. И. Интеллектуализация транспортных процессов на основе гибридных технологий и мультиагентных систем / В. И. Колесников, С. М. Ковалев, В. Н. Иванченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2012. — № 1(45). — С. 107–113.

13. Лецкий Э. К. Цифровые сервисы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении грузовыми перевозками на железнодорожном транспорте / Э. К. Лецкий, А. В. Семин // Транспорт: наука, техника, управление. — 2019. — № 9. — С. 17–20.

14. Ефанов Д. В. Технологии цифрового моделирования в железнодорожной отрасли / Д. В. Ефанов, А. С. Шиленко // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 2. — С. 34–38. — DOI 10.34649/AT.2020.2.2.007.

15. Числов О. Н. Методы цифровизации и интеллектуализации параметров логистического взаимодействия

в системе «ж.-д. станция — порт» в условиях мультиагентности транспортно-технологических процессов: монография / О. Н. Числов, М. В. Колесников, В. М. Задорожний, М. В. Бакалов и др.; ФГБОУ ВО РГУПС; АНО ВО НТУ «Сириус». — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. — 396 с.

16. Луганченко Н. М. Принципы интеллектуализации в методах моделирования железнодорожных транспортно-логистических процессов / Н. М. Луганченко, О. Н. Числов // Интеллектуальные транспортные системы: материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. — Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. — С. 239–246. — DOI: 10.30932/9785002446094-2024-239-246.

17. Karpathy A. The Unreasonable Effectiveness of Recurrent Neural Networks / A. Karpathy. URL: <https://karpathy.github.io/2015/05/21/rnn-effectiveness> (дата обращения: 12.08.2025).

18. Макаров Д. Рекуррентная нейронная сеть / Д. Макаров / URL: <https://www.dmitrymakarov.ru/learning/rnn> (дата обращения: 12.08.2025).

19. Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД»: Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04.03.2022 г. № 545/р. — 364 с.

20. Свид. 2022681955 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Axiomatic v. 1 — программа расчета параметров транспортных процессов / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко, Д. С. Безусов и др. — № 2022681124: заявл. 07.11.2022; опубл. 17.11.2022. DOI: 10.21307/tp-2021-031.

Дата поступления: 17.07.2025

Решение о публикации: 21.08.2025

Контактная информация:

ЧИСЛОВ Олег Николаевич — д-р техн. наук, проф.;
o_chislov@mail.ru

ЛУГАНЧЕНКО Никита Максимович — аспирант;
luganchenko.n@yandex.ru

БЕЗУСОВ Данил Сергеевич — канд. техн. наук, доц.;
iren306@yandex.ru

Actual Directions for the Development of Management Principles for the Transport Operations at Port Freight Stations

O. N. Chislov, N. M. Luganenko, D. S. Bezusov

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

For citation: Chislov O. N., Luganenko N. M., Bezusov D. S. Actual Directions for the Development of Management Principles for the Transport Operations at Port Freight Stations // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 685–697. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-685-697

Summary

Purpose: To develop guidelines for the management of transport operations at port freight stations, based on intelligent algorithms and the application of axiomatic design to technological processes, as well as the processing of arrays of time parameter data. **Methods:** Following a thorough analysis of the scientific papers relevant to these studies, intelligent algorithms and the author's models of digital axioms of transport processes at port stations were utilised in the selection of local operation options. **Results:** The article sets out principles for creating algorithms to manage transport operations at port freight stations. These principles are based on the author's axiomatics of technological processes and selection of effective solutions for resolving transport conflicts in the context of multiple service options. The article also discusses the evaluation and selection of rational options using intelligent methods. A study was conducted into the potential for adapting intelligent control algorithms to transport operations at port freight stations, with a view to selecting effective technological parameters for local operations. **Practical significance:** The author presents their approach to creating control algorithm flowcharts using the example of a station's transport and technological scheme. This takes into account various service options, potential transport conflicts, and time delays.

Keywords: Port freight station, transport operation parameters, axiomatics, neural network, control algorithm flowcharts, intellectualization, analytical modelling, transport conflict model schemes.

References

1. Transport of Russia: All-Russian transport weekly information and analytical newspaper. Available at: <http://www.transportrussia.ru> (accessed: May 22, 2025).
2. *Severo-Kavkazskaya zheleznaya doroga* [North Caucasian Railway]. Available at: <http://skzdservice.ru/page/4> (accessed: May 22, 2025). (In Russian)
3. Solodkiy A. I. Razvitie intellektual'nykh transportnykh sistem v Rossii: problemy i puti ikh resheniya. Novyy etap [Development of intelligent transport systems in Russia: problems and solutions. New stage]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. 2020, Iss. 6, pp. 10–19. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10. (In Russian)
4. Seliverstov S. A., Seliverstov Ya. A. Aksiomaticheskie metody organizatsii transportno-logisticheskoy infrastruktury [Axiomatic methods of organizing transport and logistics infrastructure]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh: Sbornik trudov* [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems: Collection of works]. Saint Petersburg, 2016, pp. 67–77. (In Russian)
5. Mamaev E. A., Chebotareva E. A. Matematicheskaya model' organizatsii ekspluatatsionnoy raboty v zadachakh povysheniya propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnogo uchastka [Mathematical model of organizing operational work in tasks of increasing the capacity of a railway section]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheni-*

- ya [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2025, vol. 22, Iss. 1, pp. 60–74. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-60-74. (In Russian)
6. Mirovoy opyt primeneniya sistemnykh resheniy v oblasti ITS [World experience in applying system solutions in the field of ITS]. URL: <https://dr.rosavtodor.gov.ru/department/deyatelnost-dr/intellektualnye-transportnye-sistemy/mirovoy-opyt-vnedreniya-i-razvitiya-its> (accessed: July 19, 2025). (In Russian)
7. Osokin O. V. *Intellektual'noe soprovozhdenie proizvodstvennykh protsessov na zheleznodorozhnom transporte: spetsial'nost' 05.22.08 "Upravlenie protses-sami perezovozok": dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Intellectual support of production processes in railway transport: specialty 05.22.08 "Transportation process management": Dr. tech. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2014, 355 p. (In Russian)
8. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems of Russia under new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94. (In Russian)
9. Rakhmangulov A. N. et al. Imitatsionnye modeli v tsifrovyykh dvoynikakh zheleznodorozhnykh uzlov [Simulation models in digital twins of railway nodes]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport]. 2022, Iss. 3, pp. 43–59. (In Russian)
10. Chislov O., Lyabakh N., Kolesnikov M., Bakalov M. et al. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2131, Iss. 032007. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032007.
11. Polozhishnikov V. B., Akmanov V. A., Tomashchenko S. N., Shipunov T. V. O primeneniі iskusstvennykh neyronnykh setey na zheleznodorozhnom transporte [On the application of artificial neural networks in railway transport]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, Iss. 3, pp. 33–36. (In Russian)
12. Kolesnikov V. I., Kovalev S. M., Ivanchenko V. N. Intellektualizatsiya transportnykh protsessov na osnove gibridnykh tekhnologiy i mul'tiagentnykh sistem [Intellectualization of transport processes based on hybrid technologies and multi-agent systems]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2012, Iss. 1(45), pp. 107–113. (In Russian)
13. Letskiy E. K., Semin A. V. Tsifrovye servisy intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy pri upravlenii gruzovymi perezovozkami na zheleznodorozhnom transporte [Digital services for intellectual support of decision-making in cargo transportation management on railway transport]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. 2019, Iss. 9, pp. 17–20. (In Russian)
14. Efanov D. V., Shilenko A. S. Tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya v zheleznodorozhnoy otrasli [Digital modeling technologies in the railway industry]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2020, Iss. 2, pp. 34–38. DOI: 10.34649/AT.2020.2.2.007. (In Russian)
15. Chislov O. N., Kolesnikov M. V., Zadorozhniy V. M., Bakalov M. V. et al. *Metody tsifrovizatsii i intellektualizatsii parametrov logisticheskogo vzaimodeystviya v sisteme "zh.-d. stantsiya — port" v usloviyakh mul'tiagentnosti transportno-tekhnologicheskikh protsessov* [Methods of digitalization and intellectualization of logistics interaction parameters in the "railway station — port" system under multi-agent transport-technological processes]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2022, 396 p. (In Russian)
16. Luganchenko N. M., Chislov O. N. Printsipy intellektualizatsii v metodakh modelirovaniya zheleznodorozhnykh transportno-logisticheskikh protsessov [Principles of intellectualization in methods of modeling railway transport and logistics processes]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intelligent transport systems: materials of the III International scientific and practical conference, Moscow, May 30, 2024]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta (MIIT) Publ., 2024, pp. 239–246. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-239-246. (In Russian)

17. Karpathy A. The Unreasonable Effectiveness of Recurrent Neural Networks. Available at: <https://karpathy.github.io/2015/05/21/rnn-effectiveness> (accessed: August 12, 2025).

18. Makarov D. *Rekurrentnaya neyronnaya set'* [Recurrent neural network]. Available at: (accessed: August 12, 2025). (In Russian)

19. *Instruktsiya po raschetu propusknoy i provoznoy sposobnostey zheleznykh dorog OAO "RZhD": Utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 04.03.2022 g. № 545/r* [Instructions for calculating the throughput and carrying capacity of the railways of JSC Russian Railways: Approved. by order of JSC Russian Railways dated 04.03.2022 № 545/r]. (In Russian)

20. Chislov O. N., Luganchenko N. M., Bezusov D. S. et al. *Axiomatic v. 1 — programma rascheta parametrov*

transportnykh protsessov [Axiomatic v. 1 — transport process parameter calculation program]. Svidetel'stvo RF, no. 2022681955, 2022. (In Russian)

Received: July 17, 2025

Accepted: August 21, 2025

Author's information:

Oleg N. CHISLOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; o_chislov@mail.ru

Nikita M. LUGANCHENKO — Postgraduate Student; luganchenko.n@yandex.ru

Danil S. BEZUSOV — PhD in Engineering, Associate Professor; iren306@yandex.ru

УДК 656.21

Согласованное развитие железнодорожных инфраструктур необщего и общего пользования: технология, экономика, цифровые инструменты

В. В. Панин^{1,2}, С. С. Греков¹, Г. Г. Горбунов¹, Е. В. Панин¹, Г. В. Лысов¹, А. Ф. Бородин^{1,2}

¹Акционерное общество «Институт экономики и развития транспорта», Российская Федерация, 105066, Москва, ул. Новорязанская, 24

²Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Панин В. В., Греков С. С., Горбунов Г. Г., Панин Е. В., Лысов Г. В., Бородин А. Ф. Согласованное развитие железнодорожных инфраструктур необщего и общего пользования: технология, экономика, цифровые инструменты // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 698–711. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-698-711

Аннотация

Цель: Рассмотрена проблема координации развития взаимодействующих транспортных инфраструктур, технологий их функционирования, планирования и управления с учетом реинжиниринга бизнес-процесса реализации примыканий путей необщего пользования к инфраструктуре ОАО «РЖД» от момента обращения клиента до ввода новой инфраструктуры в эксплуатацию и постинвестиционного мониторинга исполнения перевозок. **Методы:** Структурно-функциональный анализ, имитационное моделирование, теория единого технологического процесса на транспорте, экспериментальное технорабочее проектирование программного обеспечения и баз данных. **Результаты:** Исследован и спроектирован функциональный состав, алгоритмические и интерфейсные решения автоматизированной подсистемы «Единая база данных обращений о развитии существующих или строительстве новых примыканий железнодорожных путей необщего пользования к инфраструктуре ОАО «РЖД» (АС ЕТП НП.ТУ). Сформирована схема информационных потоков и архитектуры системы с учетом уровней иерархии, степени централизации самой системы, смежных систем и пользователей, базирующаяся на интеграционном взаимодействии действующих в ОАО «РЖД» автоматизированных систем. Выполнено нивелирование последствий рассинхронизации реконструктивных и технологических мероприятий, несбалансированности их параметров, что устраняет затруднения в продвижении транспортных потоков и рост операционных расходов, предотвращает потери грузовой базы и избыточную мощность отдельных элементов транспортно-логистических систем. **Практическая значимость:** Организовано единое информационное пространство для всех участников процесса рассмотрения обращений о примыкании строящихся, реконструируемых, восстановленных железнодорожных путей необщего пользования к инфраструктуре ОАО «РЖД» или о развитии существующих примыканий с оперированием едиными данными. Это обеспечивает прозрачность рассмотрения обращений, улучшает взаимодействие причастных подразделений и повышает качество управленческих решений.

Ключевые слова: Примыкания путей необщего пользования, бизнес-процесс, функциональный состав, единая база данных, реконструктивные и технологические мероприятия, взаимодействие подразделений.

Введение

Ключевой проблемой создания международных транспортных коридоров и железнодорожных подходов к морским портам является координация развития взаимодействующих транспортных инфраструктур, технологий их функционирования, планирования и управления. Рассинхронизация реконструктивных и технологических мероприятий, несбалансированность их параметров влекут за собой затруднения в продвижении транспортных потоков и повышенные операционные расходы, потери грузовой базы, а в ряде случаев — избыточную мощность отдельных элементов транспортно-логистических систем.

Актуальность данной проблематики подтверждают многие современные исследования [1–6]. Принципиальный методологический подход, развиваемый в АО «Институт экономики и развития транспорта», базируется на идеях компромиссного управления [7], обеспечивающих координацию взаимодействующих транспортных систем, каждая из которых имеет свои целевые функции и обладает самостоятельным набором управляемых переменных.

Исследования и опыт

В статье [8] сформулированы основные научно-методические проблемы — определение границ объектов исследования и проектирования; классификация припортовых транспортных узлов по возможностям и условиям развития; обоснование эффективных траекторий развития припортовых узлов; недостатки теории взаимодействия и регулирования транспортных процессов; выбор адекватного методического аппарата. За прошедшие с выхода публикации [8] восемь лет получены определенные результаты не только в исследованиях, но и в выстраивании реальных инвестиционно-строительных и эксплуатационных процессов.

До недавнего времени в выдаваемых ОАО «РЖД» технических условиях на развитие примыкающих путей необщего пользования преобладающим решением было устройство полнофункциональных промышленных железнодорожных станций с максимальной транзитностью следования по инфраструктуре общего пользования. Сформулированы [8] основные преимущества и недостатки такого подхода. В работе [9] предложен подход к решению задачи по поиску мест концентрации выполнения однородных операций и (или) их дублирования в припортовых транспортных узлах на основе теории графов, обеспечивающий отсеивание неконкурентоспособных вариантов.

Технологические аспекты этой проблемы (в том числе как частично-формализуемые, так и не подлежащие формализации) практически отработаны в совместных разработках АО «ИЭРТ», ПГУПС и РГУПС по созданию и внедрению Единых комплексных технологических процессов (ЕКТП) крупных припортовых транспортных узлов [10–12].

Существенный прогресс достигнут в применении и развитии имитационных систем совместно с УрГУПС и ООО «Транспортный алгоритм» [13, 14].

Рейнжиниринг процессов

Крупным практическим шагом в решении рассматриваемой проблематики стал коренной пересмотр порядка рассмотрения обращений в ОАО «РЖД» о примыкании и развитии железнодорожных путей необщего пользования.

Правила [15] регламентируют взаимодействие ОАО «РЖД» с владельцами путей необщего пользования. Это взаимодействие осуществляется в следующих случаях:

- при строительстве, реконструкции, восстановлении или развитии путей;
- при строительстве или реконструкции инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования и необщего пользования;

- для примыкания новых железнодорожных путей необщего пользования;
- для обеспечения перевозок дополнительных объемов грузов.

С участием авторов данной статьи структурирован рассматриваемый бизнес-процесс, включая оценку потенциальных доходов и затрат на реализацию мероприятий для пропуска дополнительного грузопотока, расчеты экономической эффективности строительства нового или развития существующего примыкания. Технологическая и коммерческая эффективность оценивается как для ОАО «РЖД», так и для заявителей, и служит основой для выбора схем финансирования мероприятий технологического присоединения.

Для ОАО «РЖД» оценка обращения о примыкании представляет собой решение технико-экономической задачи поиска набора инвестиционных и технологических мероприятий по инфраструктуре, подвижному составу и кадровому обеспечению, оцениваемого на каждом расчетном периоде t финансовым результатом:

$$R(t) = D(t) - Z(t) - E(t),$$

где $D(t)$, $Z(t)$, $E(t)$ — соответственно доходы, инвестиционные и операционные затраты в расчетном периоде t .

Обращение об устройстве (развитии) пути необщего пользования по станции примыкания k характеризуется значениями изменяемых вагонопотоков в расчетном периоде t : исходящих груженых и порожних $\{\Delta N_{kj}^{гр}(t); \Delta N_{kj}^{пор}(t)\}$, входящих груженых и порожних $\{\Delta N_{jk}^{гр}(t); \Delta N_{jk}^{пор}(t)\}$. Оценка доходов в расчетном периоде t :

$$D(t) = \sum_j [\Delta N_{kj}^{гр}(t) + \Delta N_{kj}^{пор}(t)] [d_{kj}^{тар}(t) + d_{kj}^{доп}(t)] + \sum_j [\Delta N_{jk}^{гр}(t) + \Delta N_{jk}^{пор}(t)] [d_{jk}^{тар}(t) + d_{jk}^{доп}(t)],$$

где $d_{kj}^{тар}(t)$, $d_{jk}^{тар}(t)$ — оценки тарифной составляющей доходов, приходящихся на один вагон в корреспонденциях соответственно (k, j) и (j, k) ;

$d_{kj}^{доп}(t)$, $d_{jk}^{доп}(t)$ — оценки дополнительных доходов, приходящихся на один вагон в корреспонденциях соответственно (k, j) и (j, k) , за выполнение по договорам операций перевозочного процесса, не предусмотренных тарифными руководствами.

Оценка операционных расходов включает три основных составляющих:

- 1) расходы, не зависящие от объемов перевозок, связанные с содержанием введенных в рамках проекта объектов инвестиций, $E_{сод}(t)$;
- 2) расходы, связанные с организацией и продвижением корреспонденций груженых и порожних вагонов в сообщениях со станцией примыкания k ;
- 3) изменяемая часть расходов, связанных с организацией и продвижением по железнодорожной сети других груженых и порожних корреспонденций $\{N_{ij}^{гр}(t); N_{ij}^{пор}(t), i \neq k, j \neq k\}$ под влиянием изменений корреспонденций в сообщениях со станцией примыкания k и связанных с ними инвестиционных и технологических мероприятий. Оценка операционных расходов в расчетном периоде t :

$$E(t) = E_{сод}(t) + \sum_j [\Delta N_{kj}^{гр}(t) e_{kj}^{гр}(t) + \Delta N_{kj}^{пор}(t) e_{kj}^{пор}(t)] + \sum_j [\Delta N_{jk}^{гр}(t) e_{jk}^{гр}(t) + \Delta N_{jk}^{пор}(t) e_{jk}^{пор}(t)] + \sum_{i, i \neq k} \sum_{j, j \neq k} [N_{ij}^{гр}(t) \Delta e_{ij}^{гр}(t) + N_{ij}^{пор}(t) \Delta e_{ij}^{пор}(t)],$$

где $e_{kj}^{гр}(t)$, $e_{kj}^{пор}(t)$, $e_{jk}^{гр}(t)$, $e_{jk}^{пор}(t)$ — оценки расходов, приходящихся на один груженный и порожний вагон в корреспонденциях соответственно (k, j) и (j, k) ;

$\Delta e_{ij}^{гр}(t)$, $\Delta e_{ij}^{пор}(t)$ — оценки изменяемой части расходов, приходящихся на один груженный и порожний вагон в других корреспонденциях.

Для оценки финансовых результатов заявителя и иных участников перевозочного про-

цесса записываются аналогичные формулы, однако структура расходов и доходов будет существенно отличаться для грузообразующих (грузопотребляющих) предприятий и для предприятий взаимодействующих видов транспорта.

При заключении договора присоединения закрепляются обязанности как заявителя, так и ОАО «РЖД», учитывая механизм компенсации затрат в случае неисполнения условий договора одной из сторон.

Назначение и цели автоматизации

Цели подсистемы «Единая база данных обращений о развитии существующих или строительстве новых примыканий железнодорожных путей необщего пользования к инфраструктуре ОАО «РЖД»» (АС ЕТП НП.ТУ) в составе программного обеспечения «Ведение технологии взаимодействия железнодорожных путей необщего пользования и станций примыкания нового поколения» (АС ЕТП НП) [16]:

- организация единого информационного пространства для всех участников рассматриваемого бизнес-процесса;
- повышение качества и ускорение подготовки документов;
- создание сервиса мониторинга реализации заявленных объемов перевозок.

Основные информационные потоки

Процесс базируется на интеграционном взаимодействии действующих в ОАО «РЖД» автоматизированных систем. Схема информационных потоков и архитектуры системы с учетом уровня иерархии, степени централизации самой системы, смежных систем и пользователей представлена на рис. 1.

Смежными системами являются:

- АС ЦНСИ (автоматизированная система централизованного ведения нормативно-спра-

вочной информации) — взаимодействие через АС ПРОГРЕСС;

- АС ЭТРАН НП (автоматизированная система централизованной подготовки и оформления перевозочных документов Новая платформа);
- АСОВ (программное обеспечение технологии организации вагонопотоков);
- АСКМ НП (автоматизированная система оперативного контроля и анализа качества коммерческой работы и безопасности грузовых перевозок Нового поколения);
- АС ПРОГРЕСС (имитационная ресурсная модель использования инфраструктуры ОАО «РЖД»);
- АС Паспорт НПС (автоматизированная система «Паспорт наличной пропускной способности железных дорог ОАО «РЖД»»);
- АС ППСС (автоматизированная система расчета пропускной и перерабатывающей способности станций);
- АС ТРА (ПТК ИСУЖТ НС) (автоматизированная система ведения технико-распорядительных актов станций (Подсистема нормативного обеспечения планировщика работы железнодорожных станций для ПТК ИСУЖТ сетевого уровня));
- АС ПроГруз.ТУ (система автоматизированной разработки прогноза грузовых потоков по участкам и направлениям железнодорожной сети ОАО «РЖД» в части создания модуля учета данных для проектов примыкания).

В рамках работы системы администрирования осуществляется отправка сообщений через электронный почтовый сервер ОАО «РЖД».

Функциональный состав, алгоритмы и интерфейсные решения

Логика функционирования системы и порядок взаимодействия пользователей построены в соответствии с действующими правилами [15]. В условиях взаимодействия с клиентом в циф-

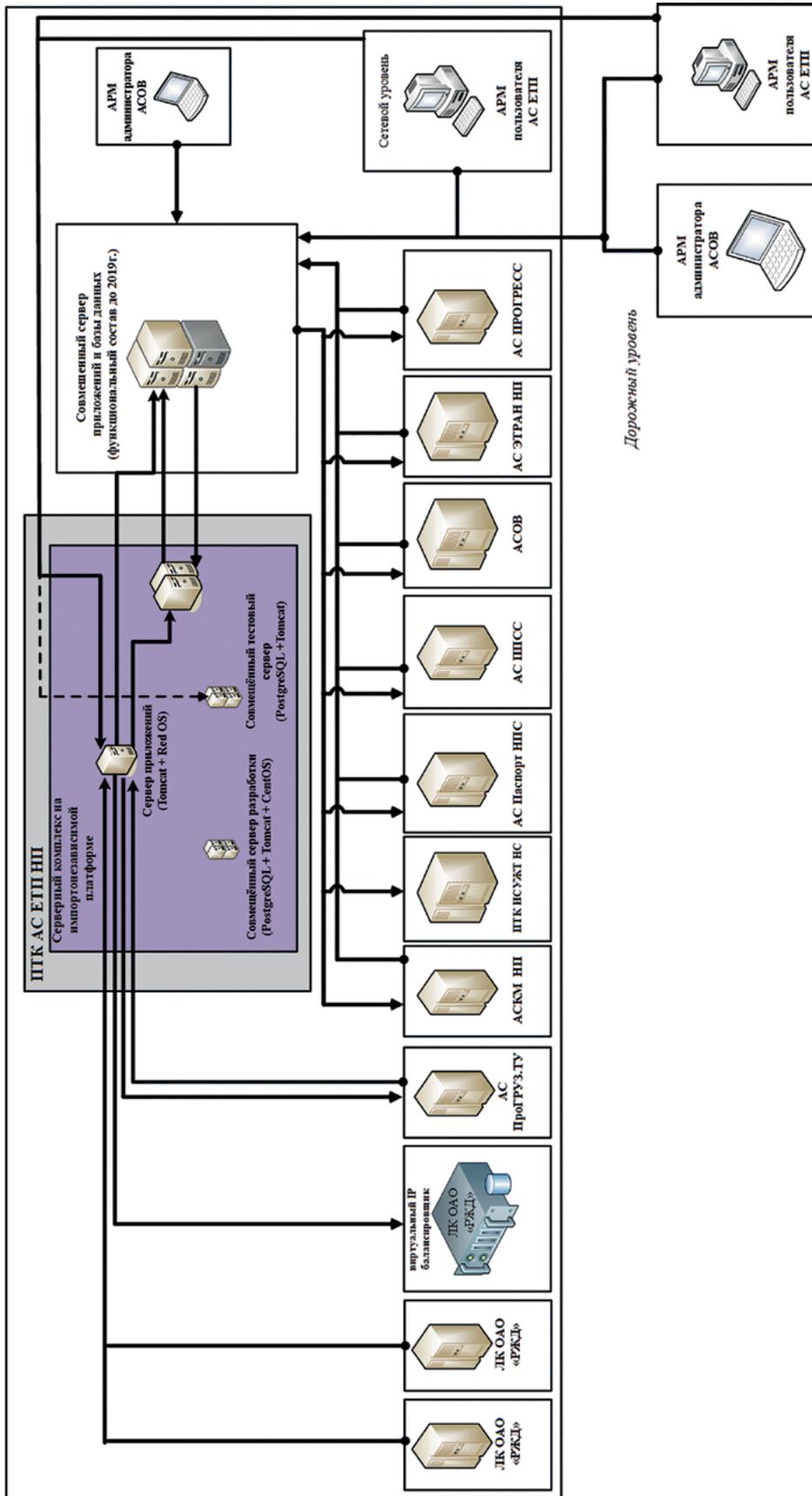


Рис. 1. Схема информационных потоков и архитектура системы с учетом уровней иерархии, степени централизации самой системы, смежных систем и пользователей

ровом режиме заявки поступают в подсистему АС ЕТП НП.ТУ из системы «Личный кабинет клиента в сфере грузовых перевозок». Реализован функционал входного контроля обращения, позволяющий принимать их для дальнейшего рассмотрения или уведомлять клиентов о необходимости внесения в них соответствующих корректировок по типовым сценариям интерактивного взаимодействия.

Поскольку правилами [15] предусмотрена возможность поступления обращения в бумажном виде, для специалистов Центра фирменного транспортного обслуживания (ЦФТО) в программном обеспечении предусмотрена возможность создания обращения с возможностью загрузки необходимых файлов.

Главной составляющей системы является единая база данных, в которой хранится вся информация о поступивших в ОАО «РЖД» обращениях о развитии примыканий, их типах и статусе рассмотрения. В единую базу данных загружаются обращения, прошедшие входной контроль.

В единую базу данных также внесены действующие на текущий момент технические условия в соответствии с ранее действовавшими правилами.

Для удобства работы в единой базе данных реализована гибкая система фильтров для возможности отображения заявок в разрезе по полигону, станции, заявителю, типу обращения и статусу рассмотрения. В зависимости от выбранных значений фильтров изменяются показатели перспективного грузооборота и статистики по выданным исходным данным и заключенным договорам технологического присоединения.

Одним из основных элементов системы, наряду с единой базой данных, является жизненный цикл обращений. Его назначение — хранение и отображение всей хронологии рассмотрения конкретного обращения, включая как результаты рассмотрения причастными подразделени-

ями ОАО «РЖД», рабочей группой и правлением ОАО «РЖД», так и договоров на выдачу исходных данных, решений о согласовании проектной документации и заключения договоров технологического присоединения.

Выдача по каждому обращению справок унифицированной формы, ведение жизненного цикла и единой базы данных обеспечивается функционалом личных кабинетов подразделений, участвующих в бизнес-процессе работы с обращениями, с уникальными наборами функций, соответствующими сферам ответственности подразделений в соответствии с правилами [15].

Например, в личном кабинете главного инженера железной дороги (НГ) реализован функционал прикрепления проекта исходных данных со схемой станции примыкания с необходимыми мероприятиями, согласования поступающей проектно-сметной документации и прикрепления проекта договора на примыкание. В личном кабинете центральной дирекции управления движением, в свою очередь, реализован функционал рассмотрения, согласования или отклонения материалов, разработанных в личном кабинете НГ.

Личный кабинет АО «ИЭРТ» обладает функционалом для отображения основных параметров заключений о соответствии заявленных объемов и корреспонденций перевозок параметрам действующих на момент обращения заявителя стратегических документов развития ОАО «РЖД», учета их в комплексных инвестиционных проектах, проведения моделирования следования заявленных потоков с определением достаточности пропускных способностей, определения набора мероприятий по развитию инфраструктуры общего пользования.

Функционал личного кабинета департамента долгосрочной тарифной политики и стратегического развития обеспечивает оценку соответствия заявленных объемов перевозок действу-

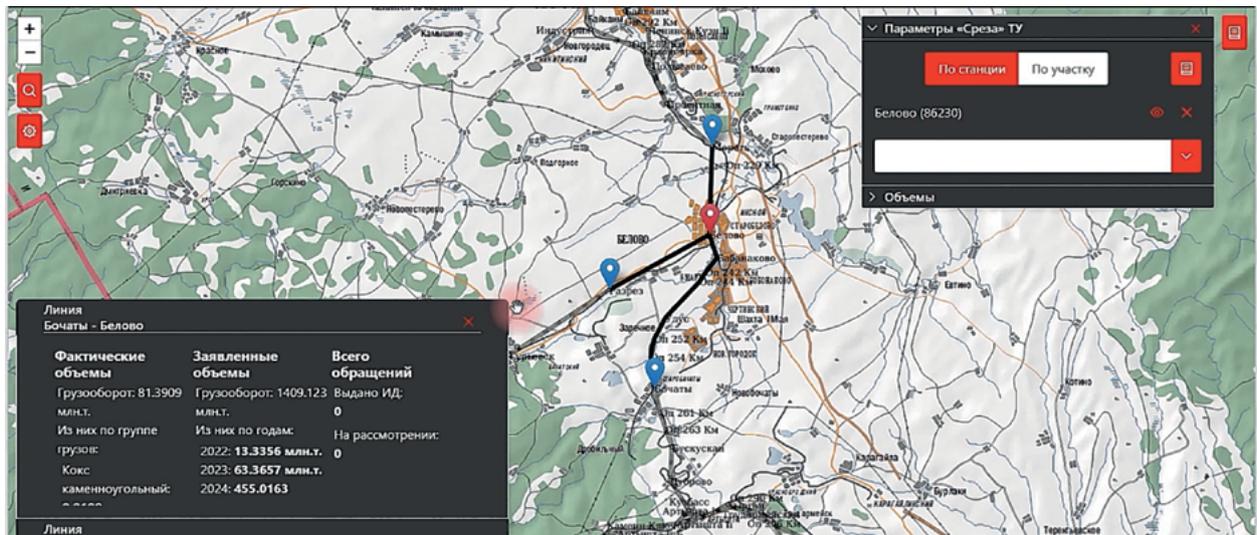


Рис. 2. Детализированная информация по участкам сети (данные условные)

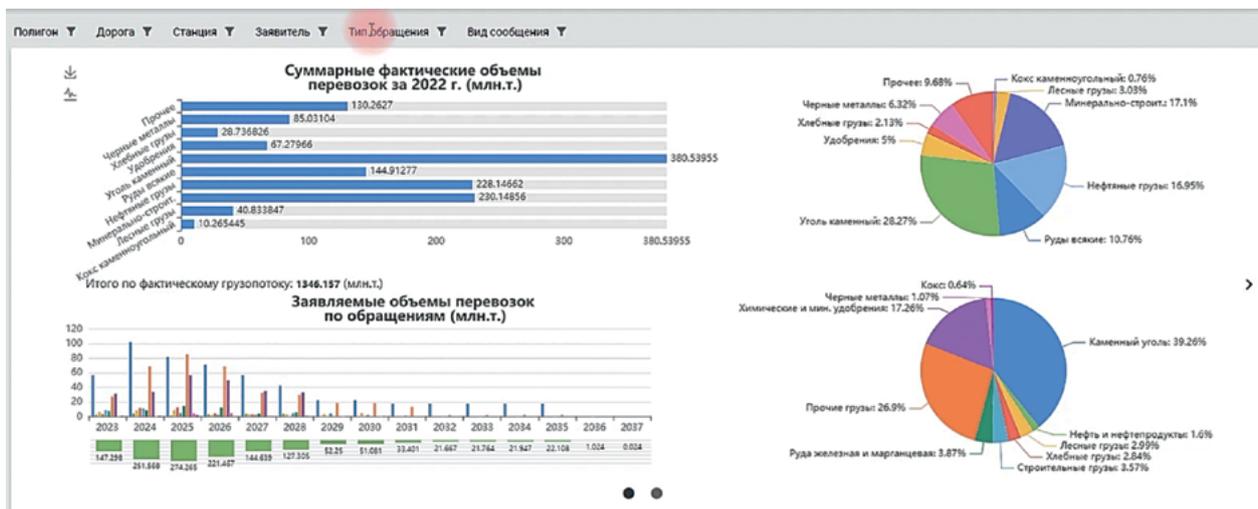


Рис. 3. Инфографика по структуре и объемам выполненных и заявляемых перевозок (данные условные)

ющим стратегическим документам развития отраслей промышленности.

Для личных кабинетов департамента инвестиций и инвестиционной службы железной дороги, помимо отображения основных параметров оценки предельного уровня инвестиций в инфраструктуру ОАО «РЖД», реализован расчет данных по тарифам и тарифному расстоянию заявляемых корреспонденций во взаимодействии с АС ЭТРАН.

Дополнительно в личных кабинетах департаментов предусмотрен функционал сравнения

фактических объемов перевозок грузов с заявляемыми по каждой корреспонденции клиента ОАО «РЖД».

За ЦФТО закреплены функции администратора процесса, позволяющие вести мониторинг хода рассмотрения обращений, вносить данные о результатах рассмотрения, изменять статусы рассмотрения с автоматизированным формированием соответствующих уведомлений клиента.

В числе интерфейсных решений АС ЕТП НП.ТУ развиваются:

– интерактивная карта, позволяющая анализировать заявляемые объемы перевозок по отдельным участкам, в сообщении отдельных дорог и полигонов, «срезы по участкам» для сравнения фактических и заявленных объемов перевозок по отдельным станциям или участкам (рис. 2), суммарные входящие и исходящие грузопотоки в сообщении между дорогами и полигонами сети ОАО «РЖД»;

– инфографика суммарных объемов перевозок с разложением на 10 основных родов грузов и заявляемых объемов перевозок в соответствии с обращениями (рис. 3).

Моделирование загрузки железнодорожной сети при увеличении и (или) перераспределении грузо-, вагоно- и поездопотоков предусматривает возможность прокладки корреспонденций в нескольких вариантах: по тарифному расстоянию, плану формирования грузовых поездов и плану маршрутизации (рис. 4), а также сравнение фактических и заявленных объемов перевозок. Синхронизация системы с АС Паспорт НПС [17–19] позволяет выявить уровни заполнения допустимых размеров движения грузовых поездов (рис. 5) и «узкие места» на маршруте следования корреспонденций в целом, а также на выделенных участках (рис. 6).

Технология функционирования

Утвержденная Технология функционирования АС ЕТП НП.ТУ (автоматизированной системы единого технологического процесса необщего пользования. Технические условия определяют:

- уровни ответственности (сферы компетенций) соответствующих специалистов и руководителей;
- порядок взаимодействия участников;
- основные информационные потоки в процессе принятия решений.

При этом мониторинг объемов перевозок грузов позволяет отслеживать разницу между заявляемым объемом на основании корреспонденций, указанных в обращении клиентом ОАО «РЖД», и фактически исполненным объемом перевозок грузов по итогам предыдущего года.

Заключение

Подсистема АС ЕТП НП.ТУ, обеспечивая достижение заявленных целей ее создания, реализует цифровое ведение бизнес-процесса от момента подачи заявки до ввода новой инфраструктуры в эксплуатацию и постинвестиционного мониторинга исполнения перевозок. При этом достигается прозрачность рассмотрения обращений, улучшается взаимодействие причастных подразделений и повышается качество управленческих решений.

Практика инвестиционной и эксплуатационной деятельности холдинга «РЖД» подтвердила правильность разработки и внедрения АС ЕТП НП.ТУ не как отдельной АСУ, а в составе программного комплекса АС ЕТП. Дело в том, что обращения заявителей поступают несинхронно, сроки и объемы ввода объектов в эксплуатацию могут изменяться в ходе выполнения принятых решений. Разные обращения требуют обеспечения доступа к одним и тем же ресурсам станционной и перегонной инфраструктуры, тягово-энергетических ресурсов в поездной и маневровой работе. Различная динамика грузопотоков вносит изменения в схемы обращения и регулирования грузовых вагонных парков.

Поэтому совместное развитие и применение методического обеспечения и рассматриваемых программных средств на основе идеологии ЕКТП в дальнейшем обеспечит своевременное принятие решений о перераспределении перевозочной мощности в случае нереализации ранее согласованных объемов перевозок, высокую результативность инвестиционных мероприятий и устойчивость транспортного обслуживания.

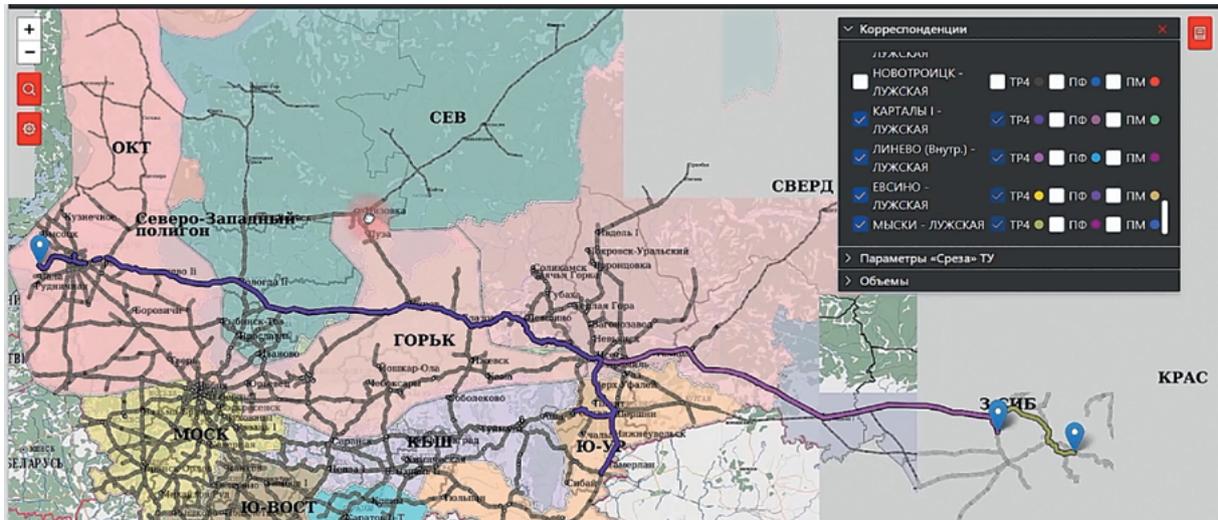


Рис. 4. Пути следования корреспонденций (представлены экспериментальные данные)

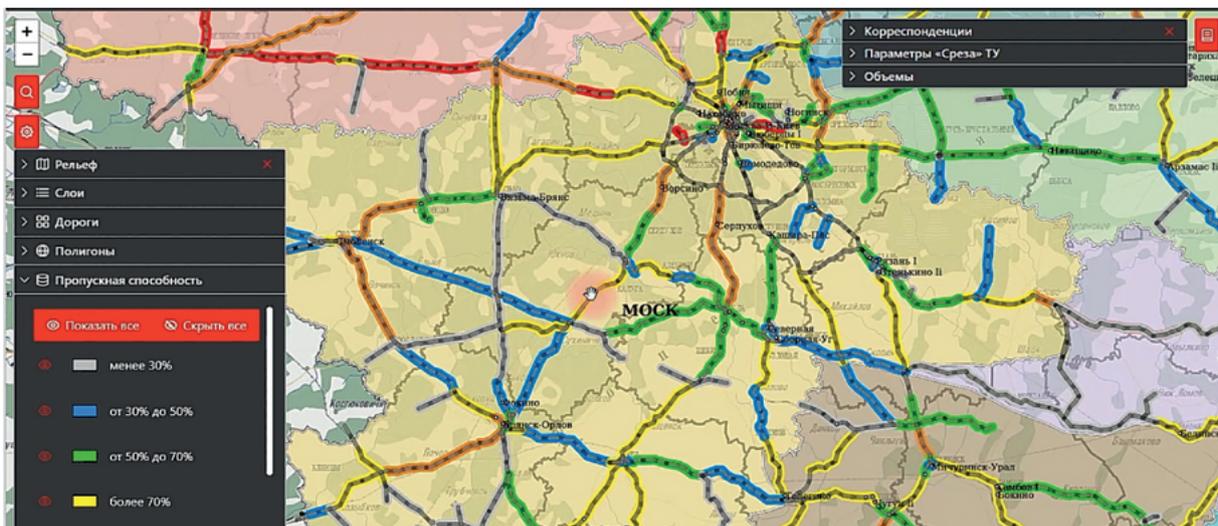


Рис. 5. Загрузка участков сети (представлены экспериментальные данные)

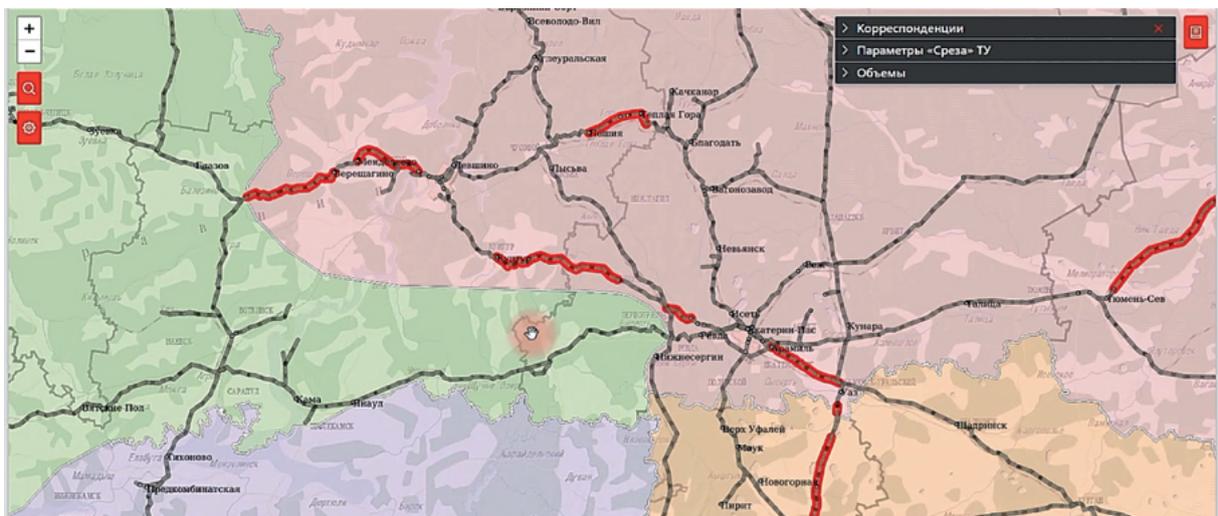


Рис. 6. «Узкие места» железнодорожной сети (представлены экспериментальные данные)

Список источников

1. Черняев А. Г. Повышение эффективности работы припортовой железнодорожной станции / А. Г. Черняев, О. И. Колобов, Е. А. Чеботарева // Железнодорожный транспорт. — 2025. — № 5. — С. 18–23.
2. Чеботарева Е. А. Системный подход к исследованию сложных объектов (на примере припортовых транспортно-технологических систем) / Е. А. Чеботарева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1(93). — С. 113–121.
3. Числов О. Н. Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева, Н. М. Луганченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2025. — Т. 22. — № 1. — С. 32–46.
4. Числов О. Н. Принципы формирования комплексного критерия оценки структуры транспортного узла / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1(93). — С. 122–131.
5. Числов О. Н. Развитие методов моделирования в выборе рациональных параметров распределения вагонопотоков припортовых транспортных систем / О. Н. Числов, М. В. Колесников, В. М. Задорожний, М. В. Бакалов и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 2(82). — С. 168–179.
6. Рыбин П. К. Особенности развития припортовых железнодорожных узлов: оптимизация инфраструктурных решений и технология взаимодействия видов транспорта / П. К. Рыбин, М. В. Четчуев // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». — 2022. — № 7. — С. 68–71.
7. Панин В. В. Задачи и методы компромиссного управления в организации перевозочного процесса / В. В. Панин // В сборнике: Кочневские чтения — 2023: современная теория и практика эксплуатационной работы железных дорог. Труды II-й Международной научно-практической конференции. — М., 2023. — С. 56–66.
8. Бородин А. Ф. Проблемы комплексного развития железнодорожной инфраструктуры в припортовых транспортных узлах / А. Ф. Бородин // Транспорт Российской Федерации. — 2017. — № 4(71). — С. 45–50.
9. Петров А. С. К вопросу концентрации и дублирования однородных операций в припортовых транспортных узлах / А. С. Петров // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». — 2022. — № 7. — С. 94–97.
10. Рыбин П. К. О взаимодействии АО «ИЭРТ» и ПГУПС при разработке Единого комплексного технологического процесса Усть-Лужского транспортного узла / П. К. Рыбин, М. В. Четчуев, А. Ю. Голубева // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». — 2023. — № 8-1. — С. 78–87.
11. Краснощек А. А. Единый комплексный технологический процесс (ЕКТП) — современная основа взаимодействия транспортных систем в рыночных условиях / А. А. Краснощек, П. К. Рыбин, В. В. Панин, М. В. Четчуев // Интеллектуальные системы на транспорте: материалы IV международной научно-практической конференции. — 2014. — С. 6–23.
12. Бородин А. Ф. Взаимодействие и развитие железнодорожных узлов Центра и Северо-Запада сети ОАО «РЖД» / А. Ф. Бородин // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». — 2023. — № 8-1. — С. 44–61.
13. Петров А. С. Методы обоснования использования и развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов припортовых транспортных узлов и подходов к ним с учетом логистического взаимодействия транспортных предприятий / А. С. Петров // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». — 2020. — № 5. — С. 80–89.
14. Бородин А. Ф. Методы гибридной технологии имитационного моделирования при выборе вариантов реконструктивных мероприятий по развитию железнодорожных направлений и крупных узлов / А. Ф. Бородин, А. А. Кравченко, К. Ю. Николаев, А. С. Петров и др.; под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой международной конференции. — М., 2021. — С. 963–971.

15. Об утверждении Правил рассмотрения обращений юридических лиц или индивидуальных предпринимателей, владеющих на праве собственности или на ином праве железнодорожными путями необщего пользования, о примыкании строящихся, реконструируемых, восстановленных железнодорожных путей необщего пользования к инфраструктуре ОАО «РЖД» или о развитии существующих примыканий (в ред. № 480/р от 28 февраля 2025 г.) — Распоряжение ОАО «РЖД» от 03.10.2022 № 2542/р. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=2022> (дата обращения: 01.08.2025).

16. Бородин А. Ф. Программное обеспечение ведения технологии взаимодействия железнодорожных путей необщего пользования и станций примыкания (АС ЕТП) / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, К. А. Капунов, Е. В. Панин и др. // Железнодорожный транспорт. — 2019. — № 4. — С. 11–18.

17. Соколов А. Ю. Автоматизированная система расчета наличной пропускной способности железных дорог / А. Ю. Соколов, С. Ю. Кириллова, Е. В. Панин // Железнодорожный транспорт. — 2017. — № 10. — С. 42–45.

18. Соколов А. Ю. Автоматизированные системы «Паспорт НПС» и АС ТУ / А. Ю. Соколов, С. Ю. Кириллова, Е. В. Панин, М. В. Тарар // Автоматика, связь, информатика. — 2020. — № 2. — С. 12–14.

19. Панин В. В. Развитие и применение автоматизированной системы «Паспорт наличной пропускной способности железных дорог ОАО «РЖД» / В. В. Панин, А. Ю. Соколов, С. Ю. Кириллова // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». — 2018. — № 3. — С. 61–65.

Дата поступления: 27.08.2025

Решение о публикации: 25.09.2025

Контактная информация:

ПАНИН Виталий Владимирович — канд. техн. наук;
iedt@iedt.ru

ГРЕКОВ Сергей Сергеевич — iedt@iedt.ru

ГОРБУНОВ Георгий Глебович — iedt@iedt.ru

ПАНИН Евгений Владимирович — iedt@iedt.ru

ЛЫСОВ Глеб Викторович — iedt@iedt.ru

БОРОДИН Андрей Федорович — д-р техн. наук, проф.;
borodinaf@mail.ru

Coordinated Development of Non-Public and Public Railway Infrastructures: Technology, Economics and Digital Tools

V. V. Panin^{1,2}, S. S. Grekov¹, G. G. Gorbunov¹, E. V. Panin¹, G. V. Lysov¹, A. F. Borodin^{1,2}

¹JSC “Institute of Economics and Development of Transport”, 24, Novoryazanskaya str., Moscow, 105066, Russian Federation

²Russian University of Transport (МИИТ), 9, bld. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, GSP-4, Russian Federation

For citation: Panin V. V., Grekov S. S., Gorbunov G. G., Panin E. V., Lysov G. V., Borodin A.F. Coordinated Development of Non-Public and Public Railway Infrastructures: Technology, Economics and Digital Tools // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 698–711. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-698-711

Summary

Purpose: The paper investigates the issue of coordinating the development of interacting transport infrastructures and their operating technologies, as well as the associated planning and management. This takes into account the re-engineering of business processes for implementing non-public railway junctions within the JSC “Russian Railways” infrastructure, from the moment a client makes a request to the commissioning of new infrastructure, as well as post-investment monitoring of transportation performance.

Methods: Structural and functional analysis, simulation modelling theory of a unified technological process in transport, experimental technical and working design of software and databases. **Results:** The functional composition, algorithms and interface solutions of the automated subsystem of the “Unified Database of Requests for the Development of Existing or Construction of New Non-Public Railway Junctions and Their Implementation into the Infrastructure of JSC “Russian Railways” (AS ETP NP.TU)” have been investigated and designed. Taking into account the hierarchy levels, the degree of centralisation of the system itself, related systems and users, the scheme of information flows and the architecture of the system have been created. They are based on the integrated interaction of automated systems operating within Russian Railways. Levelling the consequences of desynchronisation between reconstruction and technological measures and the imbalance of their parameters eliminates difficulties in promoting traffic flows and growth in operating costs. It also prevents the loss of the cargo base and the excess capacity of individual elements of transport and logistics systems. **Practical significance:** A unified information space has been organised for all participants in the process of reviewing applications to connect railway tracks under construction, reconstruction or restoration that are not in public use to the Russian Railways infrastructure, or to develop existing junctions, using unified data. This will ensure transparency in the consideration of applications, improve interaction between the relevant departments, and enhance the quality of management decisions.

Keywords: Non-public railway junctions, business process, functional composition, unified database, reconstructive and technological measures, interaction of departments.

References

1. Chernyaev A. G., Kolobov O. I., Chebotareva E. A. Povyshenie effektivnosti raboty priportovoy zheleznodorozhnoy stantsii [Increasing the efficiency of port railway station operations]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2025, Iss. 5, pp. 18–23. (In Russian)
2. Chebotareva E. A. Sistemnyy podkhod k issledovaniyu slozhnykh ob’ektov (na primere priportovykh transportno-tekhnologicheskikh sistem) [System approach to researching complex objects (on the example of port transport-technological systems)]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2024, Iss. 1(93), pp. 113–121. (In Russian)
3. Chislov O. N., Mizgireva E. E., Luganchenko N. M. Geneticheskiy komponovochnyy algoritm razmeshcheniya ob’ektov transportnogo uzla: postanovka zadachi, formirovanie i ispol’zovanie massivov dannykh, metodika resheniya [Genetic layout algorithm for placing transport hub objects: problem statement, data arrays formation and usage, solution methodology]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2025, vol. 22, Iss. 1, pp. 32–46. (In Russian)
4. Chislov O. N., Mizgireva E. E. Printsipy formirovaniya kompleksnogo kriteriya otsenki struktury transportnogo uzla [Principles of forming a comprehensive criterion for assessing the transport hub structure]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2024, Iss. 1(93), pp. 122–131. (In Russian)
5. Chislov O. N., Kolesnikov M. V., Zadorozhnyy V. M., Bakalov M. V. et al. Razvitie metodov modelirovaniya v vybore ratsional’nykh parametrov raspredeleniya vagonopotokov priportovykh transportnykh sistem [Development of modeling methods in selecting rational parameters for distributing port transport system car flows]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2021, Iss. 2(82), pp. 168–179. (In Russian)
6. Rybin P. K., Chetchuev M. V. Osobennosti razvitiya priportovykh zheleznodorozhnykh uzlov: optimizatsiya infrastrukturykh resheniy i tekhnologiya vzaimodeystviya vidov transporta [Features of port railway hubs development: infrastructure solutions optimization and transport interaction technology]. *Byulleten’ uchenogo soveta AO “IERT”* [Bulletin of the Scientific Council of JSC “IERT”]. 2022, Iss. 7, pp. 68–71. (In Russian)

7. Panin V. V. Zadachi i metody kompromissnogo upravleniya v organizatsii perevozhnogo protsessa [Tasks and methods of compromise management in transportation process organization]. *Kochnevskie chteniya — 2023: sovremennaya teoriya i praktika ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog. Trudy II-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Kochnev Readings — 2023: modern theory and practice of railway operations. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2023, pp. 56–66. (In Russian)
8. Borodin A. F. Problemy kompleksnogo razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury v priportovykh transportnykh uzlakh [Problems of integrated development of railway infrastructure in port transport hubs]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2017, Iss. 4(71), pp. 45–50. (In Russian)
9. Petrov A. S. K voprosu kontsentratsii i dublirovaniya odnorodnykh operatsiy v priportovykh transportnykh uzlakh [On the issue of concentration and duplication of homogeneous operations in port transport hubs]. *Byulleten' uchenogo soveta AO "IERT"* [Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"]. 2022, Iss. 7, pp. 94–97. (In Russian)
10. Rybin P. K., Chetchuev M. V., Golubeva A. Yu. O vzaimodeystvii AO «IERT» i PGUPS pri razrabotke Edinogo kompleksnogo tekhnologicheskogo protsessa Ust'-Luzhskogo transportnogo uzla [On the interaction between JSC "IERT" and PGUPS in developing the Unified Complex Technological Process of the Ust-Luzhsky transport hub]. *Byulleten' uchenogo soveta AO "IERT"* [Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"]. 2023, Iss. 8-1, pp. 78–87. (In Russian)
11. Krasnoshchek A. A., Rybin P. K., Panin V. V., Chetchuev M. V. Edinyy kompleksnyy tekhnologicheskyy protsess (EKTP) — sovremennaya osnova vzaimodeystviya transportnykh sistem v rynochnykh usloviyakh [Unified Complex Technological Process (UCTP) — modern basis for interaction of transport systems in market conditions]. *Intellektual'nye sistemy na transporte: materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Intellectual Systems in Transport: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference]. 2014, pp. 6–23. (In Russian)
12. Borodin A. F. Vzaimodeystvie i razvitie zheleznodorozhnykh uzlov Tsentra i Severo-Zapada seti OAO "RZhD" [Interaction and development of railway hubs in the Center and North-West of JSC "RZD" network]. *Byulleten' uchenogo soveta AO "IERT"* [Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"]. 2023, Iss. 8-1, pp. 44–61. (In Russian)
13. Petrov A. S. Metody obosnovaniya ispol'zovaniya i razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury i perevozhnykh resursov priportovykh transportnykh uzlov i podkhodov k nim s uchetom logisticheskogo vzaimodeystviya transportnykh predpriyatiy [Methods for substantiating the use and development of railway infrastructure and transportation resources of port transport hubs and approaches to them, taking into account the logistic interaction of transport enterprises]. *Byulleten' uchenogo soveta AO "IERT"* [Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"]. 2020, Iss. 5, pp. 80–89. (In Russian)
14. Borodin A. F., Kravchenko A. A., Nikolaev K. Yu., Petrov A. S. et al. Metody gibridnoy tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya pri vybore variantov rekonstruktsionnykh meropriyatiy po razvitiyu zheleznodorozhnykh napravleniy i krupnykh uzlov; pod obshch. red. S. N. Vasil'eva, A. D. Tsvirkuna [Methods of hybrid technology of simulation modeling in selecting options for reconstruction measures for the development of railway directions and large hubs; ed. by S. N. Vasil'ev, A. D. Tsvirkun]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2021): trudy Chetyrnadtsatoy mezhdunarodnoy konferentsii* [Management of Large-Scale Systems Development (MLSD'2021): Proceedings of the Fourteenth International Conference]. Moscow, 2021, pp. 963–971. (In Russian)
15. Ob utverzhdenii Pravil rassmotreniya obrashcheniy yuridicheskikh lits ili individual'nykh predprinimateley, vladeyushchikh na prave sobstvennosti ili na inom prave zheleznodorozhnyimi putyami neobshchego pol'zovaniya, o primykaniy stroyashchikhsya, rekonstruiuemyykh, vosstanovlennykh zheleznodorozhnykh putey neobshchego pol'zovaniya k infrastrukture OAO "RZhD" ili o razvitiy sushchestvuyushchikh primykaniy (v red. № 480/r ot 28

fevralya 2025 g.) [On approval of the Rules for considering applications of legal entities or individual entrepreneurs owning railway tracks of non-public use, regarding the connection of constructed, reconstructed, restored railway tracks of non-public use to the infrastructure of JSC “RZD” or the development of existing connections (as amended by No. 480/r dated February 28, 2025)]. *Rasporyazhenie OAO “RZhD” ot 03.10.2022 № 2542/r* [Order of JSC “RZD” dated October 3, 2022 № 2542/r]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=2022> (accessed: August 1, 2025). (In Russian)

16. Borodin A. F., Panin V. V., Kapunov K. A., Panin E. V. et al. Programmnoe obespechenie vedeniya tekhnologii vzaimodeystviya zheleznodorozhnykh putey neobshchego pol'zovaniya i stantsiy primykaniya (AS ETP) [Software for maintaining the technology of interaction between non-public railway tracks and adjacent stations (AS ETP)]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2019, Iss. 4, pp. 11–18. (In Russian)

17. Sokolov A. Yu., Kirillova S. Yu., Panin E. V. Avtomatizirovannaya sistema rascheta nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog [Automated system for calculating the available capacity of railways]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2017, Iss. 10, pp. 42–45. (In Russian)

18. Sokolov A. Yu., Kirillova S. Yu., Panin E. V., Tarar M. V. Avtomatizirovannye sistemy “Pasport NPS” i AS TU [Automated systems “NPS Passport” and AS TU]. *Avtomatika, svyaz’, informatika* [Automation, Communication, Informatics]. 2020, Iss. 2, pp. 12–14. (In Russian)

19. Panin V. V., Sokolov A. Yu., Kirillova S. Yu. Razvitiye i primeneniye avtomatizirovannoy sistemy “Pasport nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog OAO “RZhD” [Development and application of the automated system “Passport of the available capacity of railways of JSC “RZD”]. *Byulleten’ uchenogo soveta AO “IERT”* [Bulletin of the Scientific Council of JSC “IERT”]. 2018, Iss. 3, pp. 61–65. (In Russian)

Received: August 27, 2025

Accepted: September 25, 2025

Author’s information:

Vitaly V. PANIN — PhD in Engineering; iedt@iedt.ru

Sergey S. GREKOV — iedt@iedt.ru

Georgy G. GORBUNOV — iedt@iedt.ru

Evgeny V. PANIN — iedt@iedt.ru

Gleb V. LYSOV — iedt@iedt.ru

Andrey F. BORODIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; borodinaf@mail.ru

УДК 654.164

Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта

Д. П. Лобеев

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

Для цитирования: Лобеев Д. П. Модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 712–721. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-712-721

Аннотация

Цель: Разработать модель проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта, работающих в стандарте LTE-1800 TDD. **Методы:** Сбор, анализ, обобщение научно-технической информации и существующих решений; метод математического и программного моделирования. **Результаты:** В статье приведены результаты создания модели проектирования цифровой сети в месте пересечения со смежной цифровой сетью, работающей в стандарте LTE-1800 TDD. Модель разработана с использованием компьютерного моделирования в САПР «Альбатрос-Зона». Данная модель учитывает все помехи, действующие на проектируемую сеть, — как внешние, так и внутренние: помехи по соседнему каналу, по совмещенному каналу, интермодуляционные помехи и др. Программа симулирует работу системы для разных вариантов настройки базовых станций, и поэтому можно проанализировать работоспособность системы в случае совместной работы смежных систем. Также было проведено математическое моделирование расчета дальности радиосвязи при различных сигнально-кодовых конструкциях стандарта LTE-1800 TDD, и получены результаты, схожие с компьютерным моделированием. Сделаны выводы о применимости и работоспособности данной модели проектирования. **Практическая значимость:** Предложенная модель проектирования цифровой сети в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD может применяться при разработке и проектировании высокоскоростных магистралей, а также в случаях создания цифровых сетей технологической железнодорожной радиосвязи при необходимости. Данная модель позволит проанализировать целесообразность использования ширины полосы частоты 10 МГц и сделать выводы о применимости данной модели для конкретного случая.

Ключевые слова: LTE-1800 TDD, цифровые системы технологической радиосвязи, проектирование сетей радиосвязи, частотный ресурс, программное моделирование, железнодорожный транспорт, радиосвязь.

Введение

Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 г. № 18-46-02 регулирует основные характеристики и условия эксплуатации технологической сети железнодорожной радиосвязи стандарта LTE для работы в полосе радиочастот 1785–1805 МГц [1]. Стандартом LTE определены 6 вариантов используемых

полос частот, но по вышеупомянутому решению ГКРЧ существуют ограничения по использованию полосы шириной не более 10 МГц, так как используются защитные интервалы на границах диапазона. Поэтому есть 4 варианта использования ширины полосы частоты: 1,4 МГц, 3, 5 и 10 МГц.

Таким образом, необходимо решить задачу исследования по использованию вариантов из набора частот: 1,4 МГц, 3, 5, 10 МГц [2] путем разработки модели проектирования цифровой сети технологической радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD (далее — Модель).

Основная часть

В основе Модели приняты допущения: кадр длиной 10 мс включает в себя 10 субкадров длиной 1 мс, содержащих: передачу вниз (*D*), передачу вверх (*U*), а также специальные субкадры (*S*), в состав которых входят три поля: *UpPTS*-поле передачи вверх, *DwPTS*-поле передачи вниз и *GP*-защитный интервал. Стандартом LTE определены следующие конфигурации, представленные в (табл. 1):

На данный момент существуют проектные решения для полосы 10 МГц в «линейном» расположении базовых станций (БС). Но в случаях пересечения цифровых сетей технологической железнодорожной радиосвязи решений нет. В связи с этим требуется разработать модель проектирования цифровой сети в месте пересечения со смежной цифровой сетью, работающей в полосе 10 МГц. Учитывая ограниченность частотного ресурса, необходимо рассмотреть вариант исполь-

Таблица. 1. Конфигурации кадра при TDD

| № | Конфигурация субкадров | | | | | | | | | |
|---|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0 | D | S | U | U | U | D | S | U | U | U |
| 1 | D | S | U | U | D | D | S | U | U | D |
| 2 | D | S | U | D | D | D | S | U | D | D |
| 3 | D | S | U | U | U | D | D | D | D | D |
| 4 | D | S | U | U | D | D | D | D | D | D |
| 5 | D | S | U | D | D | D | D | D | D | D |
| 6 | D | S | U | U | U | D | S | U | U | D |

зования в разрабатываемой модели синхронного режима работы сети радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD. В качестве исходных данных для создания модели были выбраны [3]:

1. Полоса частот 1785–1805 МГц.
2. Ширина канала полосы частоты — 10 МГц.
3. Режим конфигурации субкадра TDD — 0.
4. Требуемые скорости — 2 Мбит/с по нисходящему каналу (*DL*) и 1 Мбит/с по восходящему каналу (*UL*).
5. Высота подвеса антенн БС — 20 метров.

Далее рассмотрим более подробно зоны обслуживания для каждой из БС, расположенных в месте пересечения.

Как видно из рис. 1, зона обслуживания для БС-7 с учетом влияния помех обеспечивает

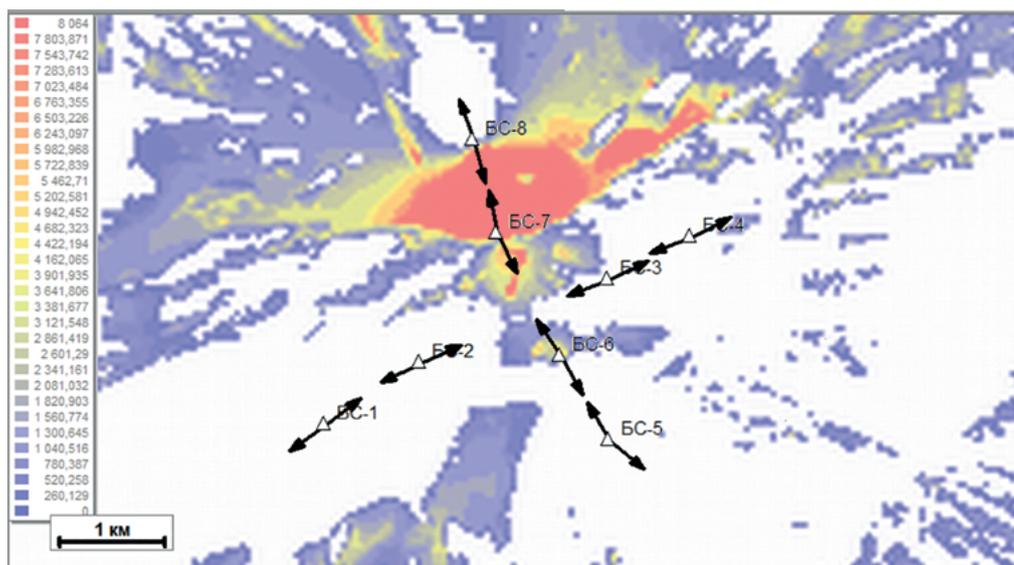


Рис. 1. Зона обслуживания и пропускная способность для БС-7

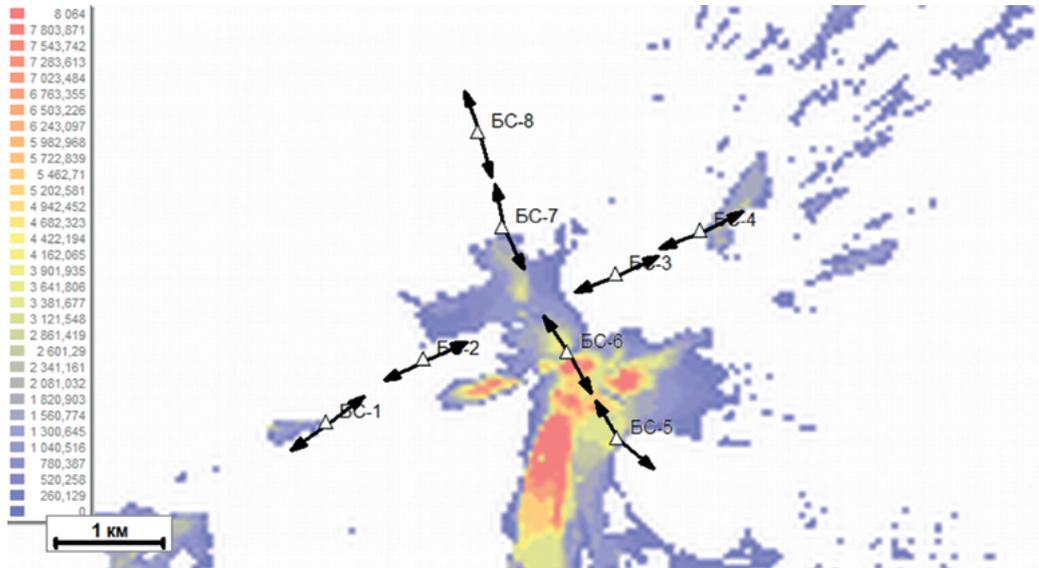


Рис. 2. Зона обслуживания и пропускная способность для BC-6

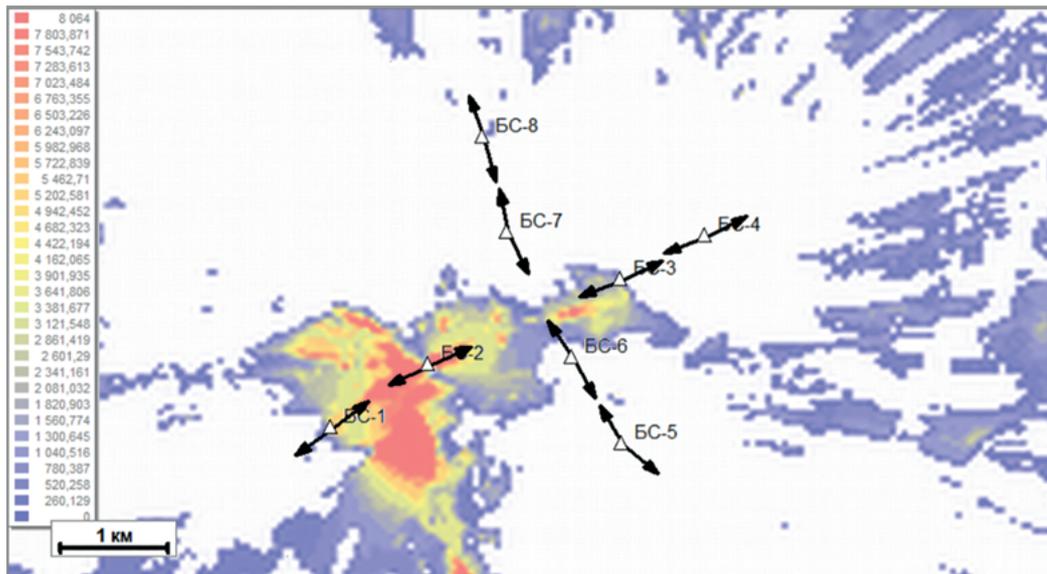


Рис. 3. Зона обслуживания и пропускная способность для BC-2

радиопокрытие с необходимыми скоростями на участке пересечения.

По полученным данным также можно сделать вывод об обеспечении необходимых скоростей на участке пересечения. По рис. 2 видно, что большая часть территории будет обеспечиваться при модуляции QPSK.

Аналогично были получены зоны обслуживания для BC-2 и BC-3. По рис. 3 и 4 видно, что на участке обеспечиваются заданные скорости.

Поскольку наша система работает в полосе 10 МГц, то все БС будут настроены на прием/передачу в одной частоте [4]. Данная ситуация приводит к деградации зоны обслуживания ввиду сильных воздействий помех на БС. Влияние помех может привести к потере пропускной способности и, соответственно, к обрыву канала связи.

На рис. 5 видно, что при влиянии помех на участке пересечения двух систем, работающих

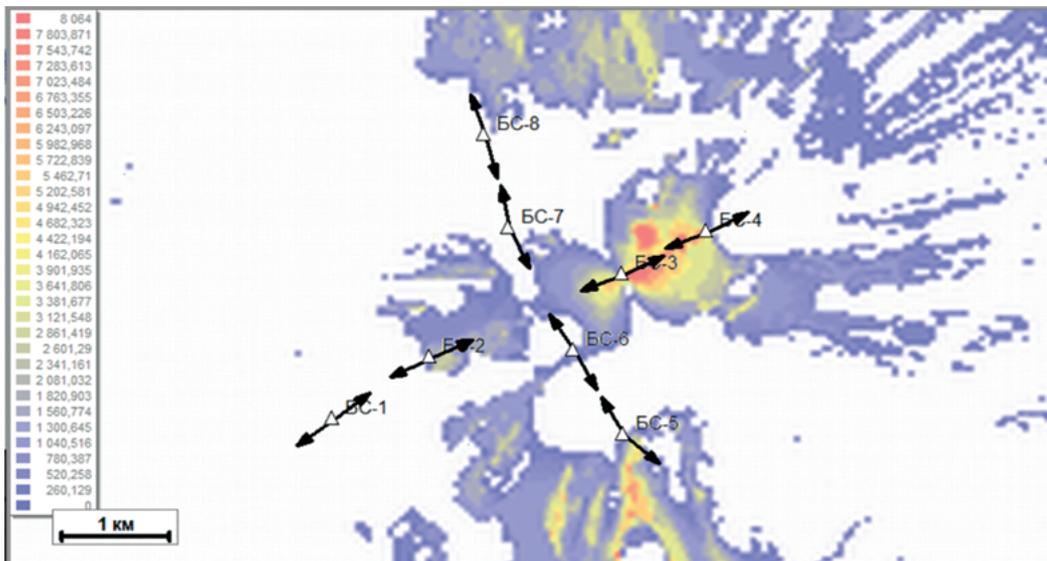


Рис. 4. Зона обслуживания и пропускная способность для БС-3

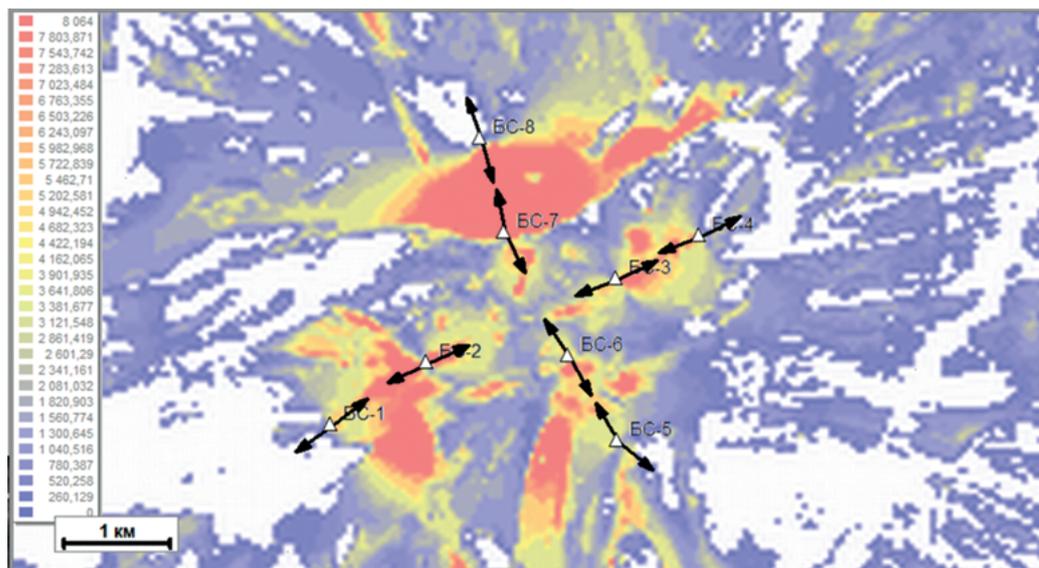


Рис. 5. Расчет скорости по модели с шириной полосы 10 МГц

в стандарте LTE-1800 TDD в полосе 10 МГц, не будут обеспечиваться требуемые скорости (как по линии «вниз», так и по линии «вверх»), что для технологии LTE является первостепенной задачей [5].

Также можно промоделировать работу системы в «синхронном» режиме работы, но для этого необходимо перенастроить базовые станции в 2 полосы по 5 МГц. Данный режим подразумевает синхронизацию всех БС сети по времени передачи, то есть БС будут чередовать режим

работы поочередно. Более подробно данный режим будет описан позже.

По результатам проведенных расчетов и моделирования работы сети модель проектирования цифровой сети для ширины полосы 10 МГц не удовлетворяет требованиям к сети и не может использоваться в данной ситуации. Поэтому необходимо создать модели, которые были бы работоспособны для данной полосы частот (1785–1805 МГц) с использованием другого номинала частоты: 1,4 МГц, 3 МГц или 5 МГц.

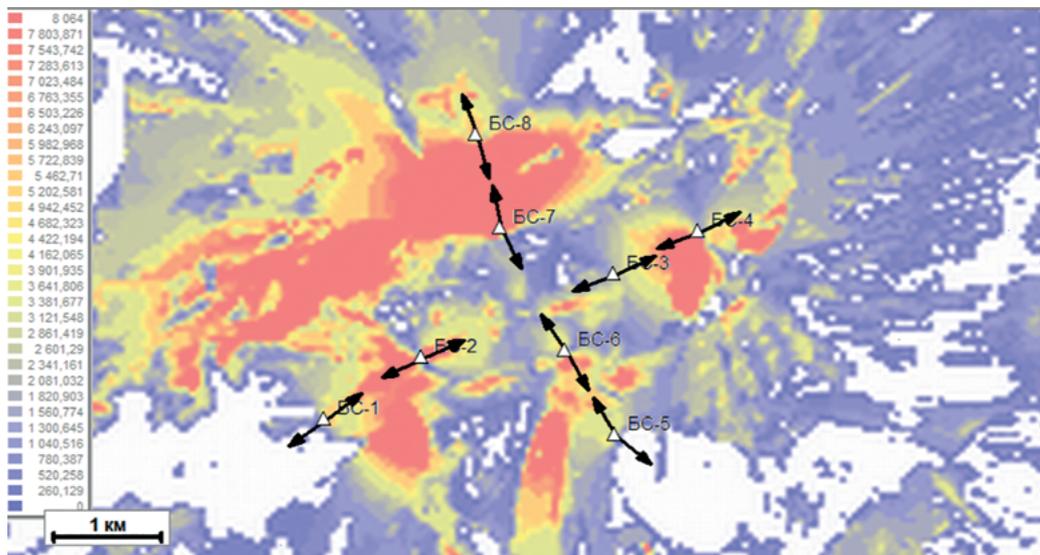


Рис. 6. Расчет скорости по модели с шириной полосы 10 МГц, с перенастройкой БС в месте пересечения на 2 полосы по 5 МГц в синхронном режиме работы

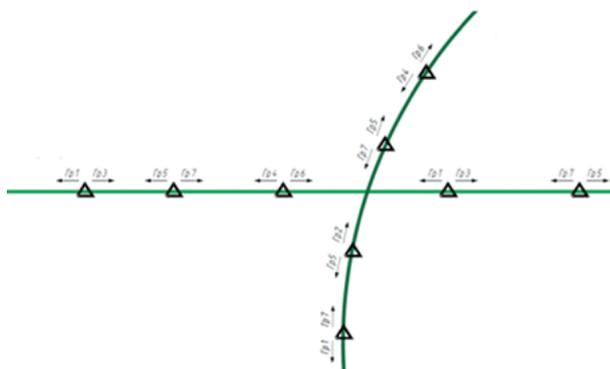


Рис. 7. Пример распределения частот по группам

При использовании других номиналов частот появляется возможность разделения частот по группам, как показано на рис. 7 для ширины полосы 1,4 МГц. Это значительно улучшит ситуацию с точки зрения ЭМС (электромагнитной совместимости) при создании моделей проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта одного диапазона частот.

Синхронный режим работы сети

Синхронный режим работы сети представляет собой режим, обеспечивающий временную синхронизацию базовых станций (БС) по сиг-

налам ГЛОНАСС, что позволяет согласовывать режимы приема и передачи между всеми элементами сети.

Поясняющая схема представлена на рис. 8.

На рисунке представлена гипотетическая сеть БС в составе пяти станций, выстроенных «в цепочку». Каждая БС имеет два сектора, которые «работают» на разных номиналах $F1$ и $F2$ с полосой 5 МГц. Например, все сектора западного направления используют номинал $F1$. Все сектора восточного направления используют частоту $F2$.

БС может находиться в одном из двух состояний — либо оба сектора одновременно работают на передачу (режим «ПРД»), либо оба сектора одновременно работают на прием (режим «ПРМ»).

Для обеспечения внутрисистемной ЭМС предлагается обеспечить временную синхронизацию режимов работы передатчиков БС так, чтобы режим «ПРД» чередовался с режимом «ПРМ». Как видно из рисунка, базовые станции с нечетными номерами 1, 3 и 5 на момент времени $t1$ будут работать на передачу. Соответственно, остальные БС с четными номерами — на прием.

При проведении предварительной оценки были заданы следующие исходные данные:

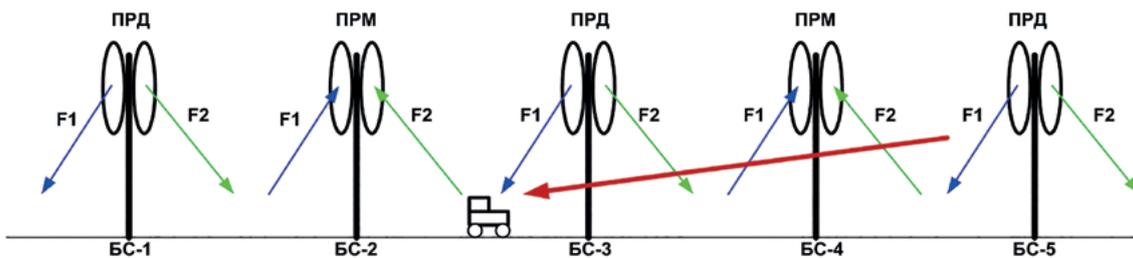


Рис. 8. Частотно-территориально-временной план сети

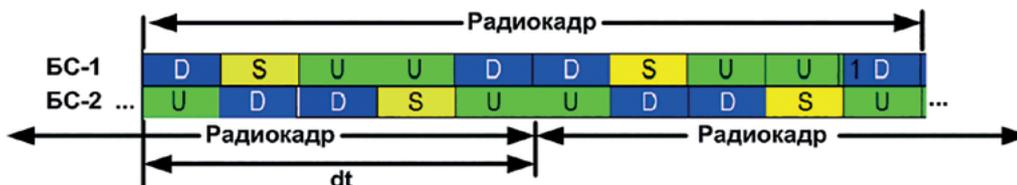


Рис. 9. Временная синхронизация режимов работы БС

1. Высота подвеса антенн БС составляет 25 м.
2. Значения ЭИИМ всех БС одинаковы.
3. Расстояния между БС одинаковы и равны d .
4. Модель распространения радиоволн — Рекомендация Р.1546.

Оценка проводится для худшего случая, когда АС находится возле БС-2 (рис. 8). Значение отношения мощности сигнала к мощности помехи будет практически совпадать со значением отношения потерь передачи на участках от БС-3 и БС 5 соответственно.

Результаты показали, что для данного случая значение SINR составляет порядка 15–18 дБ при удалении друг от друга БС на расстоянии от 1 до 2,5 км.

Учитывая, что на границе зоны обслуживания требуемое значение отношения сигнал/помеха составляет 15 дБ, вероятность возникновения помеховых ситуаций крайне мала.

Также необходимо определить вариант конфигурации субкадра TDD в радиокадре. Наиболее приемлемая с точки зрения распределения по всем каналам и дальности радиосвязи конфигурация субкадра № 1.

При выполнении данных условий возможно реализовать данный частотно-временной план.

В частности, на рис. 9 показан пример работы двух базовых станций (БС) с вариантом конфигурации №1 в синхронном режиме работы сети.

Из рис. 9 видно, что для реализации частотно-временного плана достаточно обеспечить относительный сдвиг радиокадров смежных БС на величину половины его длительности. Если длительность радиокадра 10 мс, то потребный сдвиг составит 5 мс. При этом циклы приема и передачи на смежных БС будут разные. Исключение составляет субкадр S со специальными полями. Однако чередование данного субкадра с режимами приема и передачи соседней БС позволяет минимизировать последствия.

Пример расчета скорости передачи

Представим пример расчета скорости передачи данных по восходящей (UL) и нисходящей (DL) линиям связи для полосы пропускания 10 МГц при прохождении участков пересечения двух цифровых систем, работающих в одном частотном диапазоне (табл. 2).

Предположим, высокоскоростной объект движется в зоне действия сигнально-кодовой конструкции 64QAM12.

В зоне действия сигнально-кодовой конструкции следующие исходные данные:

- количество ресурсных блоков — 50;
- количество ресурсных элементов — 84;
- продолжительность ресурсного элемента — 0,0005;
- количество бит на символ — 6.

Таблица 2. Расчет для рабочей полосы 10 МГц

| Модуляция | Ресурсыные блоки | Ресурсыные элементы | Продолжительность ресурсного элемента, с | Бит на символ | Скорость общая, Мбит/с | FEC | Скорость UL TDD № 0, Мбит/с | Скорость UL TDD № 1, Мбит/с | Скорость DL TDD № 0, Мбит/с | Скорость DL TDD № 1, Мбит/с | Мощность шума для полосы 10 МГц, дБм | SINR отношение шум, дБ | IM запас на реализацию, дБ | NF, коэф. шума | Уровень, дБ |
|-----------|------------------|---------------------|--|---------------|------------------------|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------------|----------------|-------------|
| QPSK0 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,13 | 1,26 | 0,84 | 0,42 | 0,84 | -104 | -5,1 | 2,5 | 7 | -99,6 |
| QPSK1 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,20 | 2,02 | 1,34 | 0,67 | 1,34 | -104 | -2,9 | 2,5 | 7 | -97,4 |
| QPSK2 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,25 | 2,52 | 1,68 | 0,84 | 1,68 | -104 | -1,7 | 2,5 | 7 | -96,2 |
| QPSK3 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,33 | 3,36 | 2,24 | 1,12 | 2,24 | -104 | -1 | 2,5 | 7 | -95,5 |
| QPSK4 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,50 | 5,04 | 3,36 | 1,68 | 3,36 | -104 | 2 | 2,5 | 7 | -92,5 |
| QPSK5 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,67 | 6,72 | 4,48 | 2,24 | 4,48 | -104 | 4,3 | 2,5 | 7 | -90,2 |
| QPSK6 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,75 | 7,56 | 5,04 | 2,52 | 5,04 | -104 | 5,5 | 2,5 | 7 | -89 |
| QPSK7 | 50 | 84 | 0,0005 | 2 | 16,8 | 0,80 | 8,06 | 5,38 | 2,69 | 5,38 | -104 | 6,2 | 2,5 | 7 | -88,3 |
| 16QAM8 | 50 | 84 | 0,0005 | 4 | 33,6 | 0,50 | 10,08 | 6,72 | 3,36 | 6,72 | -104 | 7,9 | 3 | 7 | -86,1 |
| 16QAM9 | 50 | 84 | 0,0005 | 4 | 33,6 | 0,67 | 13,44 | 8,96 | 4,48 | 8,96 | -104 | 11,3 | 3 | 7 | -82,7 |
| 16QAM10 | 50 | 84 | 0,0005 | 4 | 33,6 | 0,75 | 15,12 | 10,08 | 5,04 | 10,08 | -104 | 12,2 | 3 | 7 | -81,8 |
| 16QAM11 | 50 | 84 | 0,0005 | 4 | 33,6 | 0,80 | 16,13 | 10,75 | 5,38 | 10,75 | -104 | 12,8 | 3 | 7 | -81,2 |
| 64QAM12 | 50 | 84 | 0,0005 | 6 | 50,4 | 0,67 | 20,16 | 13,44 | 6,72 | 13,44 | -104 | 15,3 | 4 | 7 | -77,7 |
| 64QAM13 | 50 | 84 | 0,0005 | 6 | 50,4 | 0,75 | 22,68 | 15,12 | 7,56 | 15,12 | -104 | 17,5 | 4 | 7 | -75,5 |
| 64QAM14 | 50 | 84 | 0,0005 | 6 | 50,4 | 0,80 | 24,19 | 16,13 | 8,06 | 16,13 | -104 | 18,6 | 4 | 7 | -74,4 |

Для того чтобы вычислить теоретическую скорость на данном участке, применяется следующая формула (1):

$$v_t = \frac{N_{PB} N_{PE} n}{t_{PB}}, \text{ Мбит/с}, \quad (1)$$

где N_{PB} — количество ресурсных блоков;

N_{PE} — количество ресурсных элементов;

n — количество бит на символ;

t_{PB} — продолжительность ресурсного элемента, с.

Согласно сигнально-кодовой конструкции 64QAM12, вероятность ошибки на бит информации (FEC) составляет 0,67.

Далее найдем скорость для восходящей и нисходящей линий по формуле (2):

$$v = v_t \cdot FEC \cdot k, \quad (2)$$

где k — коэффициент на распределение субканалов TDD при различных вариантах;

FEC — количество ошибок на бит информации.

Также необходимо выяснить уровень сигнала для сигнально-кодовой конструкции.

Уровень сигнала вычисляется формулой (3):

$$X = KTB + SINR + IM + NF, \text{ дБ}, \quad (3)$$

где KTB — мощность шума для полосы 1,4 МГц, дБм;

$SINR$ — отношение сигнал/шум, дБ;

IM — запас на реализацию, дБ;

NF — коэффициент шума.

Для сигнально-кодовой конструкции 64QAM12, согласно формулам (1)–(3), получаем:

$$v_t = \frac{50 \cdot 84 \cdot 6}{0,0005} = 50,4 \text{ Мбит/с}.$$

$$v = 50,4 \cdot 0,67 \cdot 0,6 = 20,16 \text{ Мбит/с}.$$

$$X = -113 + 15,3 + 4 + 7 = -77,7 \text{ дБ}.$$

Заключение

При создании модели проектирования цифровых сетей в местах пересечения с другими цифровыми системами железнодорожного транспорта, работающими в одном диапазоне частот стандарта LTE-1800 TDD с шириной полосы частот 10 МГц, были получены следующие результаты:

1. Данная модель может применяться при проектировании цифровых систем технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE-1800 TDD в случаях минимального воздействия помех как от смежных базовых станций, так и от других источников помех.

2. Данная модель обладает работоспособностью, однако при моделировании ситуации работы системы сильно зависима от помех, которые приводят к потере пропускной способности, а также к обрывам каналам связи без применения специальных мер по противодействию интермодуляционным помехам.

3. В случае высокоскоростной магистрали данная модель проектирования цифровой сети в месте пересечения с другой цифровой системой железнодорожного транспорта стандарта LTE-1800 TDD неприменима ввиду невыполнения требований по скорости передачи данных и обеспечению работоспособности системы в условиях высокоскоростного движения.

4. В ходе исследования было установлено, что использование полосы шириной 10 МГц не удовлетворяет требованиям сети, применимым для высокоскоростных магистралей. Для этого необходимо провести дальнейшие исследования по разработке альтернативных моделей для анализа зоны обслуживания и оценки скорости передачи данных в местах пересечения радиотрасс при использовании полос частот шириной 5 МГц, 3 МГц или 1,4 МГц, которые предусмотрены стандартом LTE-1800 TDD.

Список источников

1. Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 г. № 18-46-02 «О выделении полосы радиочастот 1785–1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте».

2. Скрынников В. Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика / В. Г. Скрынников. — М.: Спорт и Культура — 2000. — 2012. 864 с.

3. ГОСТ 33973—2016. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. — М.: Стандартинформ, 2017. — 27 с.

4. ПНСТ 828—2023. Предварительный национальный стандарт российской федерации. устройства и системы электросвязи для систем управления железнодорожным

подвижным составом в автоматическом и дистанционном режимах. Общие технические требования. С 10.10.2023 до 10.10.2026.

5. Бабков В. Ю. Подходы к планированию и оптимизации сетей LTE / В. Ю. Бабков. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2013. — 78 с.

Дата поступления: 29.05.2025

Решения о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

ЛОБЕЕВ Дмитрий Петрович — аспирант кафедры «Электрическая связь»; lobeev1@mail.ru

Digital Network Modelling for Railway Transport Sector at the Intersection with Other Digital Networks

D. P. Lobehev

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

For citation: Lobehev D. P. Digital Network Modelling for Railway Transport Sector at the Intersection with Other Digital Networks // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 712–721. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-712-721

Summary

Purpose: To develop a model for designing digital networks at the intersection with other digital railway transport systems that operate using the LTE-1800 TDD standard. **Methods:** Collection, analysis and generalisation of scientific and technical information and existing solutions; mathematical and software modelling. **Results:** This paper presents the results of creating a digital network design model at an intersection with an adjacent digital network operating in the LTE-1800 TDD standard. This model was developed using computer simulation in the Albatross-Zone CAD system. The model considers all kinds of interference affecting the designed network, including external and internal sources such as adjacent and combined channel interference and intermodulation interference. The programme simulates the operation of the system with different base station configurations, enabling analysis of the system's performance in the event of joint operation with adjacent systems. Mathematical modelling was also performed to calculate the range of radio communication with various LTE-1800 TDD standard signal-code designs. The results obtained were similar to those of the computer modelling. Conclusions have been drawn regarding the applicability and operability of this design model. **Practical significance:** The proposed model for designing a digital network at points of intersection with other digital railway transport systems of the LTE-1800 TDD standard can be used for the development and design of high-speed railways, including railway digital radio communication systems, if necessary.

This model will facilitate the analysis of the feasibility of utilising a 10 MHz bandwidth and draw conclusions about the applicability of this model for a specific case.

Keywords: LTE-1800 TDD, digital radio communication systems, radio network design, frequency resource, software modelling, railway transport, radio communication.

References

1. *Reshenie GKRCCh ot 11 sentyabrya 2018 g. № 18-46-02 "O vydelenii polosy radiochastot 1785–1805 MGts dlya radioelektronnykh sredstv sukhoputnoy podvizhnoy sluzhby dlya sozdaniya tekhnologicheskikh setey svyazi na zheleznodorozhnom transporte"* [Decision of the State Commission on Radio Frequencies dated September 11, 2018 № 18-46-02 "On the allocation of the radio frequency band 1785-1805 MHz for radio electronic means of the land mobile service for the creation of technological communication networks in railway transport"]. (In Russian)

2. Skrynnikov V. G. *RadiopodsistemyUMTS/LTE. Teoriya i praktika* [UMTS/LTE radio subsystems. Theory and practice]. Moscow: Sport i Kul'tura — 2000 Publ., 2012, 864 p. (In Russian)

3. *GOST 33973—2016. Zheleznodorozhnaya elektrosvyaz'. Poezdnaya radiosvyaz'. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya* [GOST 33973-2016. Railway telecommunications. Train radio communication. Technical requirements and control methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2017, 27 p. (In Russian)

4. *PNST 828—2023. Predvaritel'nyy natsional'nyy standart rossiyskoy federatsii. ustroystva i sistemy elektrosvyazi dlya sistem upravleniya zheleznodorozhnym podvizhnym sostavom v avtomaticheskom i distantsionnom rezhimakh. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. S 10.10.2023 do 10.10.2026* [PNST 828—2023. Preliminary national standard of the Russian Federation. devices and telecommunication systems for control systems of railway rolling stock in automatic and remote modes. General technical requirements. From 10.10.2023 to 10.10.2026]. (In Russian)

5. Babkov V. Yu. *Podkhody k planirovaniyu i optimizatsii setey LTE* [Approaches to planning and optimization of LTE networks]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha Publ., 2013, 78 p. (In Russian)

Received: May 29, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information:

Dmitry P. LOBEEV — Postgraduate Student, Department of Electrical Communications; lobeev1@mail.ru

УДК 624.021

Собственные частоты вертикальных колебаний мостовых опор немассивной конструкции

В. Н. Смирнов, А. В. Ланг

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

Для цитирования: Смирнов В. Н., Ланг А. В. Собственные частоты вертикальных колебаний мостовых опор немассивной конструкции // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 722–728. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-722-728

Аннотация

Цель: Предложение методики определения собственных частот вертикальных колебаний мостовых опор немассивной конструкции, применяемых при строительстве эстакад на высокоскоростных железнодорожных магистралях. **Методы:** В статье рассматривается модель опоры в виде стержня с распределенной массой, имеющая в верхней части сосредоточенную массу, моделирующую влияние пролетного строения, опирающегося на опору. **Результаты:** Приведенные в статье данные дают возможность установить, при каких параметрах опоры можно определять собственную частоту ее вертикальных колебаний без учета упругости материала опоры и ее основания. **Практическая значимость:** Знание параметров опоры, при которых можно не учитывать упругость материала опоры и ее основания, позволяет повысить точность определения собственных частот вертикальных колебаний опор, что особенно важно при сооружении опор мостовых сооружений в виде эстакады или немассивных конструкций, применяемых при строительстве высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Ключевые слова: Собственные частоты, мостовые опоры немассивной конструкции, высокоскоростные железнодорожные магистрали (ВСМ), динамика, мосты.

Введение

Динамический расчет мостового сооружения требует проверки всех его элементов на динамические воздействия как со стороны подвижного состава, так и от прочих временных нагрузок, включая, например, сейсмические. Для проверки несущей способности моста по второй группе предельных состояний нормы проектирования требуют проверки объекта на колебания. При этом становится важным значение динамических свойств мостового сооружения, в частности частоты свободных колебаний. При расчете обычно учитывают динамическое поведение пролетных строений, но в определенных усло-

виях, принимая во внимание взаимосвязанность элементов моста (эстакада, путепровод, виадук), необходимо определять собственные частоты колебаний опор как элементов сооружения, особенно в вертикальном направлении. Особенно это представляет интерес для опор малой массивности, что характерно, например, для эстакад, виадуков и путепроводов на фундаментах мелкого заложения.

Приближенно собственную частоту такой опоры можно определить, рассмотрев ее как стойку с распределенной массой, опирающуюся на жесткое (например, скальное) основание (рис. 1) или на упругоподатливое основание.

1. Случай жесткого основания

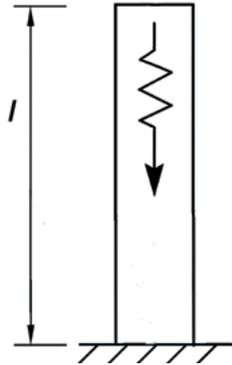


Рис. 1. Расчетная схема опоры как жестко опертого стержня

В этом случае решение задачи можно получить [1], учитывая, что для нижнего конца стойки при $x = l, u_1 = 0$, иначе $u_0 \cos kl = 0$.

Отсюда:

$$kl = \frac{1}{2}\pi; \frac{3}{2}\pi; \frac{5}{2}\pi.$$

Наименьшее значение K : $K = \frac{\pi}{2l}$.

Низшая частота опоры как стойки с зашпеленным концом может быть определена по формуле [1]:

$$\lambda = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{EF}{m}}, \tag{1}$$

где l — высота стойки;

EF — жесткость стойки при осевом действии силы;

m — погонная масса опоры.

Приведенная к верху стойки масса опоры $M_{пр}$ определяется из условия равенства частоты при распределенной и точечной массе:

$$\lambda^2 = \frac{\pi^2}{4l^2} \frac{EF}{m} = \frac{EF}{M_{пр}l}, \tag{2}$$

откуда

$$M_{пр} = \frac{ml}{0,25\pi^2} \approx 0,405 ml. \tag{3}$$

При наличии сосредоточенного на верхнем конце стойки груза массой M_{nc} в этих условиях частоты свободных колебаний стойки с распределенной массой можно найти при решении трансцендентного уравнения [1]:

$$\tan kl = -\frac{kEF}{Mcl\lambda^2}, \tag{4}$$

где $M_c = M_{пр} + M_{nc}$.

2. Случай упругоподатливого основания

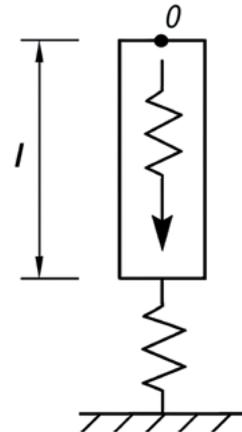


Рис. 2. Расчетная схема опоры как стержня, опертого на податливое основание

В работе [1] приведено решение задачи по определению частот свободных колебаний упруго опертого стержня с распределенной массой при наличии в верхней части груза массой M_{nc} :

$$1 - \frac{C}{EF} \frac{\tan kl}{k} = \frac{EF}{M_{nc}\lambda^2 + \frac{C}{EF}}, \tag{5}$$

где C — коэффициент податливости нижнего конца стержня;

EF — жесткой стойки.

Зная C , определяется kl и, таким образом, весь спектр собственных частот стойки.

Представляет интерес определение пределов, при которых можно пренебречь влиянием упругости опоры на ее собственные частоты и считать тело абсолютно жестким.

Это значительно упрощает решение задачи по определению частот свободных колебаний опоры (в вертикальном направлении), рассматриваемой в виде стойки на упругоподатливом основании с равномерно распределенной массой и имеющей сосредоточенную массу в верхнем конце.

Динамическая работа опор немассивной конструкции

Сооружение немассивных опор мостовых сооружений в виде многопролетных эстакад требует проверки их работы при динамическом воздействии высокоскоростного подвижного состава.

При следовании по мосту подвижного состава мостовая опора испытывает различные динамические воздействия, вызывающие в общем случае ее вертикальные, горизонтальные и вращательные колебания [1–4]. На характер колебаний опор существенно влияют инерционные, упругие и диссипативные свойства как самой опоры и пролетного строения, так и грунта основания опоры.

Далее рассматривается решение задачи о свободных колебаниях высокой облегченной промежуточной опоры балочного моста неразрезной системы на фундаменте мелкого заложения (на естественном основании). Такая конструкция наиболее оптимальна с экономической точки зрения для многопролетных эстакад на ВСМ. Опора моделируется упругим стержнем с равномерно распределенной массой по высоте, сечение стойки принято постоянным. Стойка опирается на упругое основание с коэффициентом жесткости C_1 . На верхнем конце стержня закреплена сосредоточенная масса M пролетного строения (рис. 3).

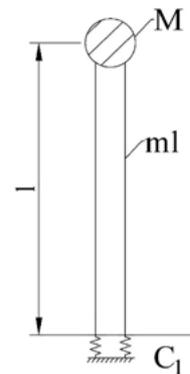


Рис. 3. Расчетная схема мостовой опоры

Продольные свободные колебания упругого стержня при отсутствии затухания определяются уравнением [5–9]:

$$a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (6)$$

где $a^2 = E / \rho$;

$u(x, t)$ — продольные перемещения сечений стержня;

E — модуль упругости материала стержня;

ρ — плотность материала опоры;

t — время.

Граничные условия:

$$\text{При } x=0: EF \frac{\partial u}{\partial x} = M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (7)$$

$$\text{При } x=l: EF \frac{\partial u}{\partial x} = -C_1 u.$$

Здесь:

l — длина стержня;

F — площадь поперечного сечения стержня;

M — сосредоточенная масса на вершине стержня.

В результате решения дифференциального уравнения (6) с граничными условиями (7) получаем собственные функции и частоты из уравнений выражений (8) и (9) при предельном переходе [10].

$$X_i = \cos(Z_i \xi) - \alpha Z_i \sin(Z_i \xi). \quad (8)$$

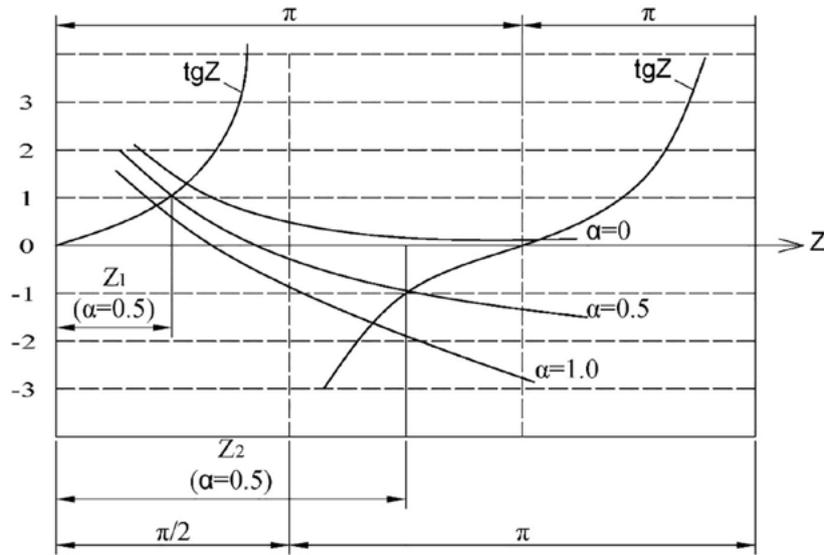


Рис. 4. Графическое решение уравнения (4) при æ² = 0,5

$$\operatorname{tg}(Z_i) = \frac{\alpha^2 - \alpha Z_i^2}{Z_i(\alpha^2 \alpha^2 + 1)}, i=1,2,\dots \quad (9)$$

Здесь: $\alpha^2 = \frac{C_1 l}{EF}$; $\alpha = \frac{M}{ml}$; $\xi = \frac{x}{l}$.

Графически уравнение (4) показано на рис. 4.

Искомые частоты свободных колебаний λ_i и корни частотного уравнения Z_i связаны зависимостью:

$$\lambda_i = Z_i \frac{\alpha}{l} \quad (10)$$

После преобразований выражение (5) может быть приведено к виду:

$$\lambda_i = \lambda_0 K_i \quad (11)$$

Здесь λ_0 — частота свободных вертикальных колебаний рассматриваемой системы как твердого тела на упругом основании, определяемая по формуле:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{C_1}{ml(\alpha + 1)}} \quad (12)$$

K_i — коэффициент, характеризующий влияние упругости опоры на собственные частоты.

Его величина определяется по формуле:

$$K_i = Z_i \sqrt{\frac{\alpha + 1}{\alpha^2}} \quad (13)$$

Графики изменения коэффициента K_i , построенные по результатам расчетов по формуле (8) в зависимости от изменения параметров α и α^2 , представлены на рис. 5. Значения α и α^2 охватывают практически все возможные их значения в реальных условиях.

Зная параметры $\alpha = \frac{M}{ml}$ и $\alpha^2 = \frac{C_1 l}{EF}$, по формуле (6) и графикам легко определить наиболее важную низшую частоту свободных вертикальных колебаний рассматриваемой системы.

Из рис. 3 видно, что до некоторого предела, определяемого параметрами $\alpha^2 \leq 0,3$ и $\alpha \leq 4$, можно пренебрегать влиянием упругости опоры на вертикальные колебания системы «опора — грунтовое основание» и считать опору абсолютно жесткой. Получаемая при этом ошибка в определении основной (первой) частоты вертикальных колебаний системы не превышает 10%.

В других случаях пренебрежение упругостью мостовой опоры в практических расчетах может дать значительные погрешности.

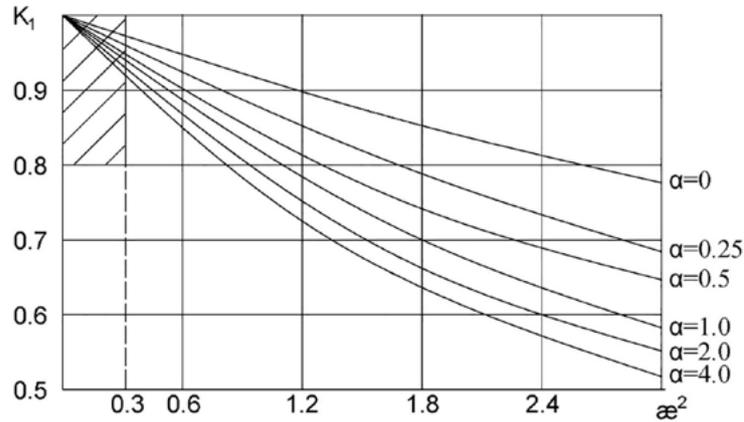


Рис. 5. Зависимость коэффициента K_1 от параметров α и α^2
(заштрихована зона, в пределах которой допускается пренебрежение упругостью)

Заключение

1. Рассмотрена методика определения собственных частот вертикальных свободных колебаний мостовой опоры на естественном основании.

2. Получены значения параметров мостовой опоры, при которых можно пренебречь влиянием упругости опоры на вертикальные колебания системы «опора — грунтовое основание» и считать ее абсолютно жесткой.

Список источников

1. Снитко Н. К. Динамика сооружений / Н. К. Снитко. — Л.: Госстройиздат, 1960.
2. Снитко Н. К. Продольные колебания стержня с распределенной массой при наличии упругой податливости концов / Н. К. Снитко // Вопросы динамики и динамической прочности. — Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1955. — Вып. 3.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. — М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959. — 439 с.
4. Яблонский А. А. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский, С. С. Нарейко. — М.: Высшая школа, 1975. — 248 с.
5. Степанов Г. Н. О расчете свайных фундаментов на действие импульсных нагрузок / Г.Н. Степанов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1968. — № 5.

6. Смирнов В. Н. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В.Н. Смирнов, А.А. Барановский // СПб ПГУПС. — 2015. — С. 274.

7. Смирнов В. Н. Опоры мостовых сооружений (проектирование, строительство, ремонт и реконструкция): учебное пособие / В. Н. Смирнов. — СПб.: Изд-во ДНК, 2013. — 568 с.

8. Смирнов В. Н. Влияние параметров мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей на динамические свойства системы «мост-бесстыковой путь» / В. Н. Смирнов, Е. Е. Луковников // Известия ПГУПС. — 2024. — Т. 26. — № 2. — С. 449–456.

9. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. — М.: Наука, 1968. — 559 с.

10. Смирнов В. Н. Вопросы проектирования и строительства мостовых сооружений для отечественных ВСМ / В. Н. Смирнов // Известия ПГУПС. — 2023. — Т. 20. № 3. — С. 645–657.

Дата поступления: 07.04.2025

Решение о публикации: 01.06.2025

Контактная информация:

СМИРНОВ Владимир Николаевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Мосты»; svn193921@rambler.ru
ЛАНГ Андрей Владимирович — инженер ИЛ «Мостовая лаборатория» кафедры «Мосты»; langandrew@yandex.ru

Vertical Natural Frequency Vibrations of Non-Massive Bridge Supports

V. N. Smirnov, A. V. Lang

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

For citation: Smirnov V. N., Lang A. V. Vertical Natural Frequency Vibrations of Non-Massive Bridge Supports // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 722–728. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-722-728

Summary

Purpose: The study proposes a methodology for determining the natural frequencies of vertical vibrations of non-massive bridge supports used in the construction of high-speed railway viaducts. **Methods:** The article sets out to explore a support model, which is represented by a rod with distributed mass, featuring a concentrated mass at the top. This mass simulates the influence of the superstructure resting on the support. **Results:** The presented data enable the identification of the support parameters under which the natural frequency of its vertical vibrations can be determined without consideration of the elasticity of the support material and its foundation. **Practical significance:** Understanding the support parameters that enable the disregard of the elasticity of the support and foundation material enhances the precision of determining the natural frequencies of vertical vibrations. This is of particular importance in the construction of bridge supports, such as viaducts, and other non-massive structures used in the construction of high-speed railways.

Keywords: Natural frequencies, non-massive bridge supports, high-speed railways (HSR), dynamics, bridges.

References

1. Snitko N. K. *Dinamika sooruzheniy* [Dynamics of structures]. Leningrad: Gosstroizdat Publ., 1960. (In Russian)
2. Snitko N. K. Prodol'nye kolebaniya sterzhnya s raspredelennoy massoy pri nalichii uprugoy podatlivosti kontsov [Longitudinal vibrations of a rod with distributed mass in the presence of elastic flexibility of the ends]. *Voprosy dinamiki i dinamicheskoy prochnosti* [Issues of dynamics and dynamic strength]. Riga: Izd-vo AN Latvyskoy SSR Publ., 1955, Iss. 3. (In Russian)
3. Timoshenko S. P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibrations in engineering]. Moscow: Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1959, 439 p. (In Russian)
4. Yablonskiy A. A., Nareyko S. S. *Kurs teorii kolebaniy* [Course of vibration theory]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1975, 248 p. (In Russian)
5. Stepanov G. N. O raschete svaynykh fundamentov na deystvie impul'snykh nagruzok [On the calculation of pile foundations for the action of impulse loads]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Foundations, foundations and soil mechanics]. 1968, Iss. 5. (In Russian)
6. Smirnov V. N., Baranovskiy A. A. *Mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh* [Bridges on high-speed railway lines]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2015, p. 274. (In Russian)
7. Smirnov V. N. *Opory mostovykh sooruzheniy (proektirovanie, stroitel'stvo, remont i rekonstruktsiya): uchebnoe posobie* [Supports of bridge structures (design, construction, repair and reconstruction): textbook]. Saint Petersburg: DNK Publ., 2013, 568 p. (In Russian)
8. Smirnov V. N., Lukovnikov E. E. Vliyanie parametrov mostovykh sooruzheniy vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh na dinamicheskie svoystva sistemy "most — bestykovoy put'" [Influence of parameters of bridge structures of high-speed railway lines on the dynamic properties of the "bridge — continuous track" sys-

tem]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024, vol. 26, Iss. 2, pp. 449–456. (In Russian)

9. Babakov I. M. *Teoriya kolebaniy* [Theory of vibrations]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 559 p. (In Russian)

10. Smirnov V. N. Voprosy proektirovaniya i stroitel'stva mostovykh sooruzheniy dlya otechestvennykh VSM [Issues of design and construction of bridge structures for domestic high-speed railways]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023, vol. 20, Iss. 3, pp. 645–657. (In Russian)

Received: April 07, 2025

Accepted: June 01, 2025

Author's information:

Vladimir N. SMIRNOV — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Bridges; svn193921@rambler.ru

Andrei V. LANG — Engineer, Bridge Laboratory, Department of Bridges; langandrew@yandex.ru

УДК 629.463

Пассивная безопасность грузовых вагонов как критерий инновационности грузового подвижного состава

А. А. Комайданов¹, А. Н. Смирнов², М. В. Зверев¹, Т. М. Чернова¹

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

²АО «НВЦ «Вагоны», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22, литера М

Для цитирования: Комайданов А. А., Смирнов А. Н., Зверев М. В., Чернова Т. М. Пассивная безопасность грузовых вагонов как критерий инновационности грузового подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 729–738. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-729-738

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы применения систем пассивной безопасности на железнодорожном транспорте. Проведен анализ существующих систем защиты, их конструктивных особенностей и эффективности. **Цель исследования:** Анализ существующих систем пассивной безопасности в транспортной отрасли и разработка обоснованных технических решений по внедрению систем пассивной безопасности на грузовых вагонах. **Результаты:** Проведен анализ развития систем пассивной безопасности; рассмотрены нормативные документы, и выявлены причины, по которым невозможно на данном этапе внедрить крэш-элементы в конструкцию грузового подвижного состава; на основе анализа систем пассивной безопасности предложены варианты для их применения на грузовом подвижном составе; предлагается применять крэш-элементы на некоторых типах грузовых вагонов, в зависимости от их конструктивных особенностей. **Практическая значимость:** Применение крэш-буферов и комбинированных сцепок на некоторых типах грузового подвижного состава в случае аварийной ситуации позволит: снизить риск схода вагона с рельсов и повреждения кузова вагона за счет поглощения энергии удара; обеспечить сохранность груза в случае аварийной ситуации; снизить вероятность разрушения объектов инфраструктуры и элементов верхнего строения пути и затраты на ремонт подвижного состава.

Ключевые слова: Пассивная безопасность, грузовой вагон, инновационный подвижной состав, жертвенные части, крэш-буфер.

Введение

Первоочередной задачей на всех этапах развития железнодорожного транспорта является обеспечение и повышение безопасности его движения. Одним из направлений повышения безопасности движения железнодорожного транспорта являются системы активной и пассивной безопасности.

В соответствии с ГОСТ 32410—2013 системы активной безопасности — это совокупность

технических средств и организационных мероприятий, направленных на предотвращение аварийных столкновений железнодорожного подвижного состава. Системы пассивной безопасности представляют собой совокупность специальных устройств и технических решений в конструкции железнодорожного подвижного состава для повышения пассивной безопасности (снижения рисков для пассажиров и персонала поезда) в случае аварийного столкновения [1, 2].

Таким образом, системы активной безопасности направлены на предотвращение аварийных ситуаций, а системы пассивной безопасности направлены на снижение последствий уже возникших аварий. Однако системы пассивной безопасности в настоящее время широко распространены лишь на пассажирском подвижном составе, в конструкции грузовых вагонов системы пассивной безопасности практически не применяются.

Цель исследования

Основной целью исследования является обзор существующих систем пассивной безопасности, применяемых в транспортной отрасли, а также выбор оптимальных конструктивных решений для возможного применения системы пассивной безопасности на грузовых вагонах в качестве инновационного направления развития в области грузового вагоностроения.

Актуальность исследования

Появление и развитие систем пассивной безопасности в транспортной отрасли неразрывно связано с повышением скоростей движения транспортных средств. Инициация разработки и последующее становление технологий пассивной защиты относится к автомобильной индустрии. В 1959 году венгерский инженер Бела Барени получил патент на конструкцию кузова автомобиля с программируемой деформацией [3].

В области железнодорожного транспорта системы пассивной безопасности получили свое развитие в конце XX века. Ключевым этапом развития таких систем стали масштабные международные научно-исследовательские работы, в рамках которых был выполнен детальный статистический анализ железнодорожных аварийных ситуаций на территории Европы [4]. Результаты краш-тестов макета подвижного состава послужили основой для создания наиболее распространенных случаев столкновений. Результатом про-

ведения этих работ стало создание европейских стандартов безопасности. Параллельно с европейскими странами в США проходили работы по изучению ударной стойкости кузовов вагонов, в результате чего также были разработаны стандарты безопасности.

В Российской Федерации первые нормативные требования по применению элементов пассивной безопасности были утверждены в середине 2011 года в рамках регламентов «О безопасности железнодорожного подвижного состава» и «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта». В настоящее время действуют регламенты Таможенного союза ТР ТС 001/2011 и ТР ТС 002/2011, а также ГОСТ 32410—2013, который распространяется на пассажирские локомотивы, моторвагонный подвижной состав и пассажирские вагоны локомотивной тяги. Стоит отметить, что требования данных нормативных документов не распространяются на грузовые вагоны [5, 6].

В настоящее время системы пассивной безопасности широко распространены на локомотивах, пассажирском, моторвагонном подвижном составе и практически не применяются на грузовом [7]. Считается, что если грузовой вагон не перевозит пассажиров, то он не нуждается в системах пассивной безопасности, однако стоимость некоторых грузовых вагонов на сегодняшний день говорит об обратном.

Современные инновационные вагоны (рис. 1) представляют собой высокотехнологичные устройства, стоимость которых существенно отличается от остальных классических вагонов.

Поиск оптимального решения

На сегодняшний день парк грузовых вагонов насчитывает существенное количество дорогостоящих вагонов [8, 9], к ним относятся: изо-термические вагоны, которые содержат дорогостоящее оборудование и конструкцию кузова



Рис. 1. Современные инновационные вагоны:

а — вагон-хопเปอร์ из алюминиевого сплава модели 19-1299 (по материалам сайта «Вагон-груз»; постоянная ссылка: <https://wagon-cargo.ru/news/rm-reyl-sertifitsirovala-alyuminiyuy-vagon-khopper-modeli-19-1299-01>); *б* — вагон-цистерна из алюминиевого сплава модели 15-6901 (по материалам сайта Univagon; постоянная ссылка: https://www.uniwagon.com/products/tank_cars_for_transportation_of_chemically_active_substances/tank_car_for_concentrated_nitric_acid_model_15-6901); *в* — вагон-цистерна из алюминиевого сплава модели 15-1232-05 (по материалам сайта fedpress; постоянная ссылка: <https://fedpress.ru/news/50/economy/3123361>); *г* — вагон-хопเปอร์ из низколегированной стали повышенной прочности (автор: А. Н. Смирнов, 2017; фото предоставлено для использования в данной статье); *д* — вагон-цистерна с котлом переменной кривизны (по материалам сайта «Моя колея 1520»; постоянная ссылка: <https://мояколея1520.рф/new/4986>); *е* — крытый вагон модели 11-2151 с раскрывающейся крышей (по материалам статьи «Инновационный вагон модели 11-2151»; постоянная ссылка: <https://dzen.ru/a/ZS7EKtYQD3pvUgFO>); *ж* — изотермический вагон-термос модели 16-1239 с увеличенным объемом кузова (автор: А. А. Комайданов, 2023; фото предоставлено для использования в данной статье); *з* — автономный рефрижераторный вагон модели 16-2155 (автор: А. А. Комайданов, 2023; фото предоставлено для использования в данной статье)

(холодильная установка, теплоизоляционный материал) (рис. 1, ж, з); вагоны из различного рода алюминиевых сплавов (рис. 1, а–в); вагоны, в конструкции которых используются высокопрочные стали (рис. 1, г); вагоны уникальной конструкции (рис. 1, д, е).

Интеграция систем пассивной безопасности в конструкцию грузовых вагонов позволяет минимизировать финансовые затраты на ликвидацию последствий аварийных ситуаций. Тем не менее существует ряд технологических ограничений, не позволяющих адаптировать защитные системы, успешно применяемые на локомотивах и пассажирском подвижном составе, к условиям эксплуатации грузовых вагонов.

Это обусловлено особенностями эксплуатации парка грузовых вагонов, его конструктивного исполнения и требованиями к эксплуатации.

Важно отметить, что эффективность внедрения систем пассивной безопасности должна оцениваться не только с позиции снижения затрат на восстановительные работы, но и с точки зрения влияния на безопасность перевозочного процесса в целом.

Рассмотрим типовые сценарии аварийных ситуаций с грузовыми вагонами, при которых применение крэш-систем позволяет минимизировать последствия:

1. Сценарий роспуска вагонов с сортировочной горки. Характеризуется разрушением опорной поверхности заднего упора, что приводит к передаче нагрузки от корпуса автосцепки на ударную розетку. В результате возникает максимальный изгибающий момент на хребтовой балке из-за эксцентриситета нагрузки относительно геометрического центра. Последствия: критическое повреждение или полная деформация хребтовой балки, вывод вагона из эксплуатации.

2. Сценарий выдавливания порожнего вагона. При осаживании состава происходит вертикальное смещение порожнего вагона (при отсутствии

ограничителей саморасцепа). Автосцепка упирается в кузов соседнего вагона. После трогания поезда выдавленный вверх вагон опускается, и зев автосцепки повреждает кузов (котел с опасным грузом) соседнего вагона.

Одной из самых распространенных систем пассивной безопасности, применяемых на железных дорогах, является крэш-система. Это аварийная система безопасности, предназначенная для защиты пассажиров при столкновении подвижного состава с препятствием. Принцип работы крэш-систем основан на поглощении кинетической энергии подвижного состава (объектов аварийного столкновения) при помощи необратимой деформации конструкций, входящих в эту систему, не являющихся элементами несущей конструкции кузова.

Согласно требованиям ГОСТ 32410—2013, для проверки эффективности аварийных крэш-систем используются два основных сценария:

- столкновение с груженым вагоном массой 80 т на скорости 36 км/ч;
- столкновение с неподвижным препятствием массой 10 т на скорости 72 или 110 км/ч — в зависимости от конструкционной скорости участвующей в столкновении единицы подвижного состава.

Также перед проектированием устройств поглощения энергии проводят расчет суммарной энергоемкости:

$$U = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \cdot \frac{V^2}{2}, \quad (1)$$

где U — энергоемкость проектируемого устройства;

M_1 — масса исследуемого подвижного состава;

M_2 — масса препятствия;

V — скорость столкновения.

Крэш-система должна обладать следующими энергетическими характеристиками:

– для поездов массой 250 т с конструкционной скоростью до 160 км/ч требуется установка с энергопоглощающей способностью около 3 МДж;

– для поездов массой 250 т с конструкционной скоростью 160 км/ч и выше требуется установка с энергопоглощающей способностью до 4,5 МДж.

Попытки создания систем пассивной безопасности на грузовых вагонах были предприняты для некоторых типов вагонов-цистерн, а именно [10]:

– защитные дуги (рис. 2, *а*), предохраняющие запорные вентили и оборудование при опрокидывании вагона;

– специальные экраны (рис. 2, *б*), защищающие корпус котла с опасным грузом от пробоя автосцепкой в случае аварийной ситуации;

– задние упоры автосцепки, закрепленные на заклепках и рассчитанные на отрыв от хребтовой балки при превышении допускаемых нагрузок;

– прочие предохранительные элементы: скобы, мембраны и кронштейны, предотвращающие саморасцеп вагонов;

– установка современных поглощающих аппаратов с повышенной энергоемкостью.

Существующие элементы системы пассивной безопасности на вагонах-цистернах не обеспечи-

вают достаточный уровень безопасности при аварийных ситуациях, так как их основная функция ограничивается сохранением перевозимого груза и не предусматривает поглощение ударной энергии.

При разработке и эксплуатации железнодорожного подвижного состава, учитывая особенности конструкции железнодорожного пути, были созданы различные типы систем пассивной безопасности. Эти системы эффективно используются как в отечественном и зарубежном подвижном составе, так и в элементах железнодорожного пути:

– тупиковая призма (рис. 3, *а*) — устанавливается в конце тупиковых путей, предназначена для остановки и предотвращения выхода состава за пределы пути. Формируются засыпкой металлопродукции инертными материалами, такими как: песок; гравийная смесь;

– путевой энергопоглощающий упор (рис. 3, *б*) — устанавливается в конце тупиковых путей на вокзалах. Предназначен для остановки неконтролируемого движения состава со скоростью не более 10 км/ч за счет поглощения кинетической энергии состава;

– крэш-буфер (рис. 3, *в*) — устанавливается на лобовой части локомотивов и головных вагонов моторвагонного подвижного состава. При

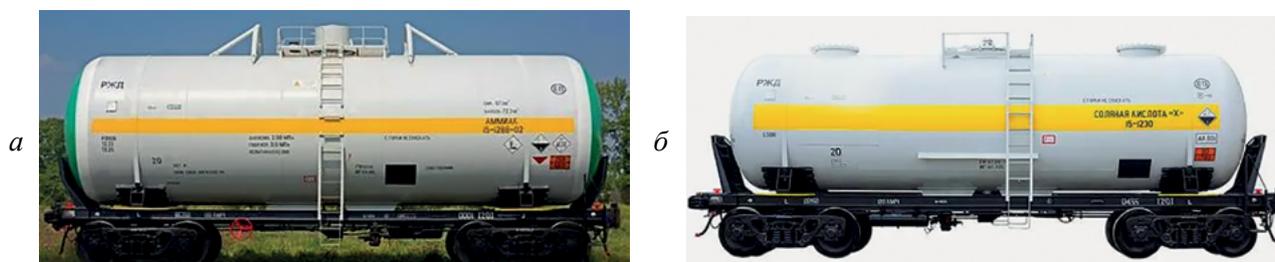


Рис. 2. Вагоны-цистерны с элементами пассивной безопасности:

а — вагон-цистерна модели 15-1288-01 с защитными дугами (по материалам сайта RMrail; постоянная ссылка: <https://rmrail.ru/catalogue/vagony-tsisterny-dlya-khimicheskikh-spetsialnykh-gruzov-snizhenykh-uglevodorodnykh-gazov/vagon-tsisterna-dlya-perevozki-ammiaka>);

б — вагон-цистерна модели 15-1230 с защитными экранами (по материалам сайта RMrail; постоянная ссылка: <https://rmrail.ru/catalogue/vagony-tsisterny-dlya-khimicheskikh-spetsialnykh-gruzov-snizhenykh-uglevodorodnykh-gazov/vagon-tsisterna-dlya-perevozki-solyanoy-kisloty>)



Рис. 3. Современные системы пассивной безопасности, применяемые в железнодорожной отрасли:

а — тупиковая призма (автор: А. Н. Смирнов, 2019; фото предоставлено для использования в данной статье); *б* — путевой энергопоглощающий упор (автор: М. В. Зверев, 2020; фото предоставлено для использования в данной статье); *в* — крэш-буфер (по материалам сайта kompass; постоянная ссылка: <https://www.kompass.com/z/pl/p/axtone-s-a/pl001870/crash-buffers/398d5ad3-4045-412b-9bd1-5dd3170a456f/>); *з* — комбинированная сцепка с крэш-буфером (по материалам сайта etrain; постоянная ссылка: <https://etrain.ru/2022/02/22/эп2д-система-пассивной-безопасности/>); *д*, *е* — межвагонный крэш-модуль (по материалам сайта etrain; постоянная ссылка: <https://etrain.ru/2022/02/22/эп2д-система-пассивной-безопасности/>); *ж*, *з* — крэш-бокс: уровень 1 — муфта с газо-гидравлическим элементом поглощения энергии; уровень 2 — ребристая конструкция для поглощения энергии; уровень 3 — разрушаемый элемент, поглощающий энергию (по материалам сайта eltroll; постоянная ссылка: https://eltroll2.ru/zd/dizel/RA3_M3.php?ysclid=mcumehzsgz972610867)

столкновении подвижного состава происходит поглощение энергии необратимой деформацией трубы крэш-буфера;

– сцепка, комбинированная с крэш-модулем (рис. 3, *з*);

– межвагонный крэш-модуль (рис. 3, *д, е*) — устанавливается в головных и промежуточных узлах сцепления высокоскоростного подвижного состава. Принцип действия основан на редуцировании трубы, проходящей через матрицу;

– крэш-бокс (рис. 3, *ж, з*) — устанавливается на головных вагонах высокоскоростного подвижного состава перед кабинами машиниста. Существуют одноуровневые и многоуровневые конструкции крэш-боксов, где элементы деформируются постепенно в зависимости от скорости столкновения.

Среди рассмотренных крэш-систем для грузовых вагонов больше подходят крэш-буферы и комбинированная сцепка с крэш-модулем. Их использование на грузовых вагонах остается на усмотрение собственников.

Из-за сложности внесения изменений в документацию предлагается устанавливать крэш-модули на концевых балках вагонов с обеих сторон. При проектировании возможна поэтапная установка комбинированной сцепки.

Однако в настоящий момент применение крэш-буферов на грузовом подвижном составе, представленных на рис. 3, невозможно ввиду отсутствия требований в нормативной документации к крэш-буферам, предназначенным для эксплуатации на грузовых вагонах.

Заключение

Проведенный анализ систем пассивной безопасности, применяемых на железнодорожном транспорте, показал, что применение крэш-буферов и комбинированных сцепок на некоторых типах грузового подвижного состава в случае аварийной ситуации позволит:

– снизить риск схода вагона с рельсов и повреждения кузова вагона за счет поглощения, перенаправления или распределения энергии удара;

– обеспечить сохранность груза и предотвратить его утечку в случае аварийной ситуации;

– уменьшить вероятность повреждения объектов железнодорожной инфраструктуры и элементов верхнего строения пути либо сократить последствия нанесенного ущерба;

– оптимизировать затраты на ремонт подвижного состава за счет уменьшения повреждений и внедрения взаимозаменяемых крэш-систем.

Также применение на грузовом вагоне систем пассивной безопасности (крэш-буферов, комбинированной сцепки с крэш-модулем) может стать дополнительным критерием при оценке степени инновационности вагона [11] за счет повышения показателей надежности подвижного состава: безотказности, долговечности и ремонтпригодности.

На наш взгляд, необходим пересмотр ГОСТ 32410—2013 «Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля» в части распространения его требований в том числе и на грузовой подвижной состав.

Список источников

1. Семенов Д. О. Повышение эффективности безопасности и надежности на железнодорожном транспорте / Д. О. Семенов // ТДР. — 2017. — № 3.

2. ГОСТ 32410—2013. Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля. — М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

3. Феданов Н. С. Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта / Н. С. Феданов // Теория и практика современной науки. — 2019. — № 9(51).

4. Науменко Н. Е. Оценка эффективности использования элементов защиты конструкций локомотивов и

вагонов пассажирских поездов при аварийных соударениях / Н. Е. Науменко, И. Ю. Хижа, Е. Г. Богомаз, Д. В. Горобец // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2005. — № 8.

5. Беспалько С. В. Моделирование процесса аварийного столкновения электропоезда, оборудованного жертвенными буферами / С. В. Беспалько, В. М. Меланин, М. А. Гордеев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 4(45).

6. Милованов В. К. Опыт создания систем пассивной безопасности для подвижного состава железных дорог / В. К. Милованов, С. В. Дмитриев, А. В. Белянки, С. Ю. Петухов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2022. — № 3(100).

7. Науменко Н. Е. Оценка влияния работы устройств системы пассивной безопасности пассажирского локомотива на его динамическую нагруженность при аварийном столкновении с препятствием на железной дороге / Н. Е. Науменко, И. Ю. Хижа // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2013. — № 1(43).

8. Бороненко Ю. П. Эффективность применения алюминиевых сплавов в конструкциях грузовых вагонов / Ю. П. Бороненко, А. А. Комайданов, С. М. Дробжев // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. — С. 7–13.

9. Boronenko Yu. P. Evaluation of the Efficiency of the Use of Hopper Cars with Aluminum Alloy Bodies / Yu. P. Boronenko, A. A. Komaidanov, S. M. Drobzhev // BRICS Transport. — 2023. — Vol. 2. — Iss. 3.

10. Евсеев Д. Г. О необходимости формирования единой технической политики для обеспечения пожарной безопасности перевозки опасных грузов по железным дорогам России / Д. Г. Евсеев, В. Н. Филиппов, Г. И. Петров, Ю. Н. Шебеко и др. // Пожаровзрывобезопасность. — 2018. — № 9.

11. Комайданов А. А. Примеры оценки инновационности грузовых вагонов / А. А. Комайданов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. — С. 53–55.

Дата поступления: 06.06.2025

Решение о публикации: 25.07.2025

Контактная информация:

КОМАЙДАНОВ Алексей Андреевич — аспирант;
komaidanovnvc@yandex.ru

СМИРНОВ Анатолий Николаевич — начальник
испытательного центра; smirnovnvc@mail.ru

ЗВЕРЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук,
доц.; zverev-nvc@yandex.ru

ЧЕРНОВА Татьяна Михайловна — аспирант;
chernova@pgups.ru

Passive Safety of Freight Wagons As a Criterion for Innovative Freight Rolling Stock

A. A. Komaidanov¹, A. N. Smirnov², M. V. Zverev¹, T. M. Chernova¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²JSC “NVC “Vagony”, 22, litera M, pr-kt Moskovsky, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Komaidanov A. A., Smirnov A. N., Zverev M. V., Chernova T. M. Passive Safety of Freight Wagons As a Criterion for Innovative Freight Rolling Stock // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 729–738. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-729-738

Summary

The article discusses the application of passive safety systems in railway transport. It analyzes existing protection systems, their design features, and effectiveness. **Purpose:** To analyze existing passive safety systems in the transport industry and develop reasonable technical solutions for implementing passive safety systems on freight wagons. **Results:** The development of passive safety systems has been analysed; regulatory documents have been reviewed and the reasons why it is not possible to introduce crash elements into the design of freight rolling stock at this stage have been identified. Based on the analysis of passive safety systems, options for their application on freight rolling stock have been proposed, including crash elements on certain types of freight cars, depending on their design features. **Practical significance:** The use of crash buffers and combined couplers on certain types of freight railcars in emergency situations will reduce the risk of car derailment and damage to the car body due to the absorption of impact energy. This will ensure the safety of cargo in emergency situations, reduce the probability of damage to infrastructure facilities and elements of the track superstructure, and decrease the cost of rolling stock repair.

Keywords: Passive safety, freight railcar/wagon, innovative rolling stock, sacrificial elements, crash buffer.

References

1. Semenov D. O. *Povyshenie effektivnosti bezopasnosti i nadezhnosti na zhelezнодорожном транспорте* [Improving the efficiency of safety and reliability in railway transport]. TDR, 2017, Iss. 3. (In Russian)
2. *GOST 32410—2013. Kresh-sistemy avariynnye zhelezнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya* [Crash systems emergency railway rolling stock for passenger transportations. Technical requirements and methods of control]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 12 p. (In Russian)
3. Fedanov N. S. Razvitie vysokoskorostnogo zhelezнодорожного транспорта [Development of high-speed railway transport]. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science]. 2019, Iss. 9(51). (In Russian)
4. Naumenko N. E., Khizha I. Yu., Bogomaz E. G., Gorobets D. V. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya elementov zashchity konstruktivnykh lokomotivov i vagonov passazhirskikh poezdov pri avariynnykh soudarniyakh [Assessment of the effectiveness of using elements of protection of locomotive and passenger car structures in case of emergency collisions]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zhelezнодорожного транспорта* [Science and progress of transport. Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]. 2005, Iss. 8. (In Russian)
5. Bepalko S. V., Melanin V. M., Gordeev M. A. Modelirovanie protsessa avariynogo stolknoveniya

elektropoezda, oborudovannogo zhertvennymi buferami [Modeling the process of emergency collision of an electric train equipped with sacrificial buffers]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2015, Iss. 4(45). (In Russian)

6. Milovanov V. K., Dmitriev S. V., Belyanki A. V., Petukhov S. Yu. Opyt sozdaniya sistem passivnoy bezopasnosti dlya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Experience in creating passive safety systems for railway rolling stock]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics]. 2022, Iss. 3(100). (In Russian)

7. Naumenko N. E., Khizha I. Yu. Otsenka vliyaniya raboty ustroystv sistemy passivnoy bezopasnosti passazhirskogo lokomotiva na ego dinamicheskuyu nagruzhennost' pri avariynom stolknovenii s prepyatstviem na zheleznoy doroge [Assessment of the impact of passive safety system devices on the dynamic loading of a passenger locomotive during an emergency collision with an obstacle on the railway]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of transport. Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]. 2013, Iss. 1(43). (In Russian)

8. Boronenko Yu. P., Komaidanov A. A., Drobzhev S. M. Effektivnost' primeneniya aluminiyevykh splavov v konstruktsiyakh gruzovykh vagonov [Efficiency of using aluminum alloys in freight car structures]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–24 avgusta 2023 goda* [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XVII International scientific and technical conference, St. Petersburg, August 21–24, 2023]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2024, pp. 7–13. (In Russian)

9. Boronenko Yu. P., Komaidanov A. A., Drobzhev S. M. Evaluation of the Efficiency of the Use of Hopper Cars with Aluminum Alloy Bodies. *BRICS Transport*. 2023, vol. 2, Iss. 3.

10. Evseev D. G., Filippov V. N., Petrov G. I., Shebeko Yu. N. et al. O neobkhodimosti formirovaniya edinoy tekhnicheskoy politiki dlya obespecheniya pozharnoy bezopasnosti perevozki opasnykh gruzov po zheleznykh dorogam Rossii [On the necessity of forming a unified technical policy to ensure fire safety in the transportation of dangerous goods by rail in Russia]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and Explosion Safety]. 2018, Iss. 9. (In Russian)

11. Komaidanov A. A. Primery otsenki innovatsionnosti gruzovykh vagonov [Examples of assessing the innovation of freight cars]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–24 avgusta 2023 goda* [Rolling Stock of the 21st Century: Ideas, Requirements, Projects: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, August 21–24, 2023]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2024, pp. 53–55. (In Russian)

Received: June 06, 2025

Accepted: July 25, 2025

Author's information:

Aleksey A. KOMAIDANOV — Postgraduate Student;
komaidanovnvc@yandex.ru

Anatoly N. SMIRNOV — Head of the Testing Center;
smirnovnvc@mail.ru

Mikhail V. ZVEREV — PhD in Engineering, Associate Professor;
zverev-nvc@yandex.ru

Tatyana M. CHERNOVA — Postgraduate Student;
chernova@pgups.ru



УДК 692.6

К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 2 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями без припазовки)

М. Д. Вебер¹, А. В. Кузнецов²

¹ООО «Инфорспроект», Российская Федерация, 115280, Москва, ул. Ленинская слобода, 19

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

Для цитирования: Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 2 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями без припазовки) // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 739–749. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-739-749

Аннотация

Цель: Разъяснить на конкретных примерах последовательность выполнения поверочных расчетов каменных бескосоурных лестниц в рамках обследований их технического состояния. **Материалы и методы:** Расчеты выполнены при помощи математического аппарата и данных, собранных в процессе предыдущего исследования. **Результаты:** Приведено развернутое описание отобранных примеров. Даны рекомендации по анализу полученных результатов. **Практическая значимость:** Предоставление практикующим инженерам расчетных инструментов для оценки состояния ценных исторических конструкций.

Ключевые слова: Каменные конструкции, бескосоурные лестницы, висячие лестницы, обследование, реконструкция, реставрация, поверочные расчеты, примеры расчета.

Введение

Настоящая статья является продолжением предыдущей работы [1], в которой дан обзор и выполнен анализ сведений по каменным бескосоурным («висячим») лестницам.

Приведенный ниже аналитический расчет иллюстрирует наиболее характерный случай прямого марша с плоскими (без припазовки) ступенями из Путиловского известняка.

Для иных случаев необходимо опираться на данные и источники, приведенные в предыдущей статье [1].

Для примера возьмем условный марш (рис. 1) со следующими характеристиками: ступени выполнены из Путиловского известняка; количество ступеней — $n = 10$ шт.; вынос консоли (рис. 2) — $L = 1000$ мм (1,0 м); сечение ступеней (рис. 3) — пря-

моугольное; ширина без учета валика $b = 320$ мм (0,32 м); высота ступени $h = 150$ мм (0,15 м); имеется полукруглый валик с радиусом кривизны $r_v = 30$ мм (0,03 м); ступени надвинуты друг на друга на $\Delta = 50$ мм; лестничная клетка примыкает к служебным помещениям; погонный собственный вес лестничного ограждения составляет 0,5 кН/м; высота лестничного ограждения составляет 1,2 м; линия ограждения проходит на расстоянии 0,1 м от края марша.

Для расчета примем следующие физико-механические свойства материала:

1. Плотность Путиловского известняка принимаем по справочным материалам (наибольшее значение) в соответствии с [2] — 2800 кг/м³.
2. Временное сопротивление сжатию в сухом виде принимаем по справочным материалам.

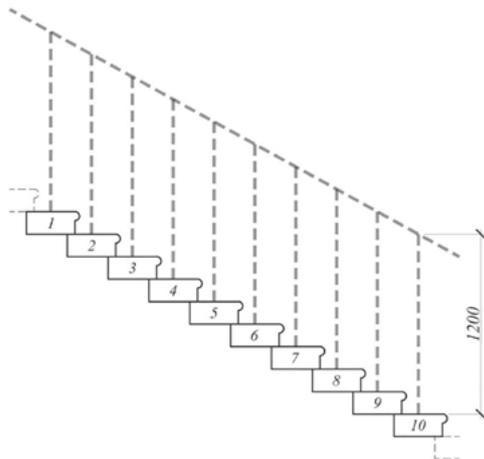


Рис. 1. Продольная схема марша

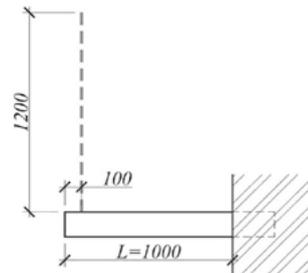


Рис. 2. Поперечная схема марша

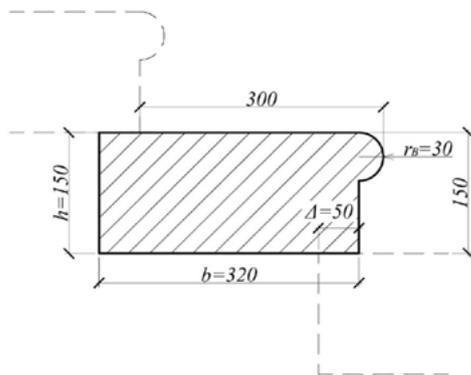


Рис. 3. Сечение ступени

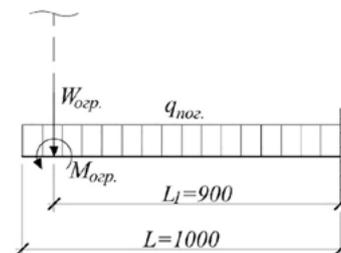


Рис. 4. Расчетная схема ступени для расчета на изгиб

Стоит обратить внимание на учет следующих факторов:

- камень для «ступенной» плиты отбирался наилучшего качества и проходил дополнительный входной контроль на площадке;

- указываемое в современных источниках временное сопротивление на сжатие для Путиловской плиты от 30 до 200 МПа [2] [3, с. 29] приведено для камня, добытого из пластов в их текущем состоянии для применения в качестве отделочного материала;

- справочный источник, который, по нашему мнению, наиболее соответствует расчету ступеней, — это результаты испытаний Путиловской плиты в том виде, в котором она поставлялась до революции как строительный материал для несущих конструкций; данные испытания, выпол-

ненные лабораторией Петербургского института инженеров путей сообщения для постройки Троицкого моста в Петербурге, показали временное сопротивление на сжатие в сухом виде, равное $\sigma_{сж} = 91,9$ МПа [4, с. 45, 66; 5, с. 89].

3. Временное сопротивление растяжению принимаем равным $\sigma_p = 91,9 \cdot 1/30 = 3,06$ МПа, по данным М. П. Субботина [5, с. 112].

4. Временное сопротивление изгибу принимаем равным $\sigma_{из} = 91,9 \cdot 1/6 = 15,31$ МПа, см. там же [5, с. 112].

5. Для расчета деформаций изгиба Путиловского известняка модуль упругости в справочной литературе отсутствует, поэтому для расчета примем его по аналогу исходя из следующих факторов:

- модуль упругости прямо пропорционален прочности природного камня [6, с. 126];

– по стратиграфии Путиловский известняк относится к нижнему ордовику [3, с. 19] и имеет сопоставимую или большую прочность, чем известняки среднего и нижнего карбона Московской синеклизы Русской платформы [7, табл. 7; 8, с. 127–128];

– для известняков среднего и нижнего карбона покрова Русской платформы усредненное значение модуля упругости при сжатии составляет $4,2 \cdot 10^5$ кг/см² (41 202 МПа) [8, с. 96; 9, с. 65];

– при растяжении модуль упругости в среднем в 2,4 раза меньше, чем при сжатии [6, с. 128]; при расчете на изгиб часть сечения работает на растяжение.

В расчет примем модуль упругости Путиловского известняка консервативно, как для известняков среднего и нижнего карбона Московской синеклизы, предполагая его работу на растяжение: $E = 41\,202 / 2,4 = 17\,167,5$ МПа = 175 000 кг/см².

6. Для расчета деформаций кручения модуль сдвига G Путиловского известняка вычисляется по результатам испытаний, в которых определяется коэффициент Пуассона ν . В нашем случае эти сведения о коэффициенте Пуассона ν в справочных данных отсутствуют, поэтому для расчета его значение примем по аналогу исходя из следующих факторов:

– для вычисления модуля сдвига используется отношение $G = E / (2(1 + \nu))$, из чего следует, что больший коэффициент Пуассона соответствует меньшему модулю сдвига, т. е. является более консервативным;

– для сопоставимых известняков Московской синеклизы усредненные значения коэффициента Пуассона варьируются от 0,25 до 0,32 [7, табл. 7];

– известняк как слоистый материал имеет различный коэффициент Пуассона параллельно слоистости и перпендикулярно слоистости; согласно усредненным справочным данным [10, с. 117] для известняков коэффициент Пуассона параллельно слоистости равен 0,28 и перпендикулярно слоистости — 0,3;

– для природного камня, работающего на растяжение, коэффициент Пуассона в 2–3 раза ниже, чем при сжатии [6, с. 128]; в нашем случае, как упоминалось выше, наибольшая величина является консервативной;

– для каменной кладки в соответствии с СП 15.13330.2020 [11, п. 6.31] модуль сдвига $G = 0,4 E_0$, где E_0 — модуль упругости при сжатии; из соотношения $G = E_0 / (2(1 + \nu))$ следует, что коэффициент Пуассона для кладки в общем случае в своде правил принимается равным 0,25.

В расчет принимаем коэффициент Пуассона консервативно наибольшим из вышеперечисленных — 0,32. Тогда модуль сдвига будет равен $G = E / (2(1 + \nu)) = 17\,167,5 / (2 \times (1 + 0,32)) = 6502,84$ МПа = 66 287 кг/см².

Выполним сбор нагрузок.

1. При заданной функции лестничной клетки вертикальная равномерно распределенная кратковременная нормативная нагрузка в соответствии с СП 20.13330.2016 [12, табл. 8.3, п. 12, а] составит 3,0 кПа. Расчетное значение данной нагрузки с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,2$ (согласно СП 20.13330.2016 [12, п. 8.2.7]) составит 3,6 кПа.

Приведем вертикальную равномерно распределенную нагрузку к погонной для расчета ступеней на изгиб. Ширина приложения нагрузки, с учетом надвижки ступеней и валика, составит $b + r_{\text{в}} - \Delta = 300$ мм (0,3 м). Погонное значение нормативной нагрузки составит $q_{\text{пог.вр.н}} = 0,3$ (ширина приложения) $\times 3,0 = 0,9$ кН/м. Погонное значение расчетной нагрузки составит $q_{\text{пог.вр.р}} = 0,3$ (ширина приложения) $\times 3,6 = 1,08$ кН/м.

Приведем вертикальную равномерно распределенную нагрузку к сосредоточенной для расчета на кручение. Площадь приложения нагрузки составит 0,3 (ширина приложения) $\times 1,0$ (вынос консоли L) = 0,3 м². Приведенная сосредоточенная нормативная нагрузка составит $P_{\text{ин}} = 0,3$ (площадь приложения) $\times 3,0 = 0,9$ кН. Приведенная

сосредоточенная расчетная нагрузка составит $P_i = 0,3$ (площадь приложения) $\times 3,6 = 1,08$ кН.

2. При заданной функции лестничной клетки горизонтальная равномерно распределенная кратковременная нормативная нагрузка на ограждение лестницы в соответствии с СП 20.13330.2016 [12, п. 8.2.6, в] составит 0,8 кН/м. Расчетное значение данной нагрузки с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,2$ (согласно СП 20.13330.2016 [12, п. 8.2.7]) составит 0,96 кН/м.

Приведем горизонтальную равномерно распределенную нагрузку к сосредоточенному моменту в точке крепления ограждения для учета при расчете ступеней на изгиб. Нормативное значение момента составит $M_{огр.н} = 0,3$ (длина приложения) $\times 1,2$ (плечо приложения нагрузки, равное высоте ограждения) $\times 0,8 = 0,29$ кНм. Расчетное значение момента составит $M_{огр.р} = 0,3$ (длина приложения) $\times 1,2$ (плечо приложения нагрузки, равное высоте ограждения) $\times 0,96 = 0,35$ кНм.

3. Нагрузку от собственного веса ступеней вычислим на основании площади поперечного сечения ступени с учетом валика. Она составит $0,32$ (ширина b) $\times 0,15$ (высота h) $+ 1/2 \times \pi \times 0,03^2$ (площадь валика) $= 0,05$ м².

Нормативное значение погонной нагрузки от собственного веса консольной части ступени для расчета ступеней на изгиб составит $q_{пог.ст.н} = 0,05 \times 2800$ (плотность материала) $= 140$ кг/м $= 1,38$ кН/м. Расчетное значение данной нагрузки с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,1$ (согласно СП 20.13330.2016 [12, табл. 7.1]) составит $q_{пог.ст.р} = 1,52$ кН/м.

Нормативное значение сосредоточенной нагрузки от собственного веса консольной части ступени для расчета ступеней на кручение составит $W_{ст.н} = 0,05 \times 2800$ (плотность материала) $\times 1,0$ (вынос консоли L) $= 140$ кг $= 1,38$ кН. Расчетное значение данной нагрузки с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,1$ (согласно

СП 20.13330.2016 [12, табл. 7.1]) составит $W_{ст.р} = 1,52$ кН.

4. Расчетное значение нагрузки от собственного веса ограждения с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,2$ (согласно СП 20.13330.2016 [12, табл. 7.1]) составит $1,2 \times 0,5 = 0,6$ кН/м.

Приведем вертикальную погонную нагрузку к сосредоточенной для расчета ступеней на изгиб и кручение. Нормативное значение сосредоточенной нагрузки составит $W_{огр.н} = 0,3$ (длина приложения) $\times 0,5 = 0,15$ кН. Расчетное значение сосредоточенной нагрузки составит $W_{огр.р} = 0,3$ (длина приложения) $\times 0,6 = 0,18$ кН.

5. В итоге нагрузки для расчета прочности ступеней на изгиб следующие:

– равномерно-распределенная по всей длине консоли:

$$q_{пог.р} = q_{пог.вр.р} + q_{пог.ст.р} = 1,08 + 1,52 = 2,6 \text{ кН/м};$$

– сосредоточенный момент на расстоянии 0,1 м от конца консоли:

$$M_{огр.р} = 0,35 \text{ кНм};$$

– сосредоточенная вертикальная сила на расстоянии 0,1 м от конца консоли (т. е. с плечом от места заделки $L_1 = 1,0 - 0,1 = 0,9$ м):

$$W_{огр.р} = 0,18 \text{ кН}.$$

6. В итоге нагрузки для расчета деформативности ступеней на изгиб следующие:

– равномерно распределенная по всей длине консоли:

$$q_{пог.н} = q_{пог.вр.н} + q_{пог.ст.н} = 0,9 + 1,38 = 2,28 \text{ кН/м} = 2,32 \text{ кг/см};$$

– сосредоточенный момент на расстоянии 0,1 м от конца консоли:

$$M_{огр.н} = 0,29 \text{ кНм} = 2957 \text{ кгсм};$$

– сосредоточенная вертикальная сила на расстоянии 0,1 м от конца консоли (т. е. с плечом от места заделки $L_1 = 1,0 - 0,1 = 0,9$ м):

$$W_{огр.н} = 0,15 \text{ кН} = 15,3 \text{ кг}.$$

7. В итоге нагрузки для расчета прочности ступеней на кручение следующие:

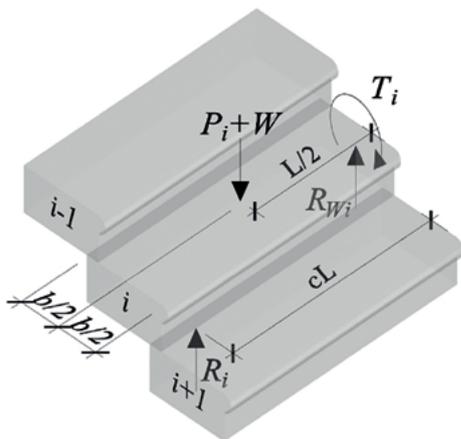


Рис. 5. Схема плоской ступени при расчете на кручение

– сосредоточенная в центре ступени

$$P_i = 1,08 \text{ кН};$$

– сосредоточенная в центре ступени:

$$W = W_{\text{огр.р}} + W_{\text{ст.р}} = 0,18 + 1,52 = 1,7 \text{ кН}.$$

8. В итоге нагрузки для расчета деформативности ступеней на кручение следующие:

– сосредоточенная в центре ступени:

$$P_{i\text{н}} = 0,9 \text{ кН};$$

– сосредоточенная в центре ступени:

$$W_{\text{н}} = W_{\text{огр.н}} + W_{\text{ст.н}} = 0,15 + 1,38 = 1,53 \text{ кН}.$$

Выполним проверку прочности ступеней на изгиб в соответствии с предпосылками Дж. Хеймана [13] (рис. 4).

1. Определим момент сопротивления сечения ступени при изгибе:

$$W_{\text{изг}} = bh^2 / 6 = 32 \cdot 15^2 / 6 = 1200 \text{ см}^3.$$

2. Определим максимальный изгибающий момент:

$$M = q_{\text{погр}} L^2 / 2 + M_{\text{огр.р}} + W_{\text{огр.р}} L_1 = 2,6 \cdot 1,0^2 / 2 + 0,35 + 0,18 \times 0,9 = 1,812 \text{ кНм} = 18471 \text{ кгсм}.$$

3. Определим максимальное нормальное напряжение изгиба:

$$\sigma = M / W_{\text{изг}} = 18471 / 1200 = 15,4 \text{ кг/см}^2 = 1,52 \text{ МПа}.$$

4. Определим коэффициент запаса:

$k = \sigma_{\text{из}} / \sigma = 15,31 / 1,52 = 10,07$, что больше рекомендованного $k = 3$, т. е. прочность ступени достаточна для восприятия изгибающих нагрузок.

Выполним проверку деформативности ступеней при изгибе.

1. Определим момент инерции сечения ступени при изгибе:

$$I_{\text{изг}} = bh^3 / 12 = 32 \cdot 15^3 / 12 = 9000 \text{ см}^4.$$

2. Максимальный прогиб определим, используя принцип суперпозиции прогибов от отдельных нагрузок:

– прогиб от равномерно распределенной нагрузки по всей длине консоли:

$$f_1 = q_{\text{погр.н}} L^4 / 8EI_{\text{изг}} = (2,32 \cdot 100^4) / (8 \cdot 175000 \cdot 9000) = 0,019 \text{ см};$$

– прогиб от сосредоточенного момента на расстоянии 0,1 м от конца консоли:

$$f_2 = M_{\text{огр.н}} L_1 (2L - L_1) / 2EI_{\text{изг}} = (2957 \cdot 90) \times ((2 \cdot 100) - 90) / (2 \cdot 175000 \cdot 9000) = 0,0093 \text{ см};$$

– прогиб от сосредоточенной вертикальной силы на расстоянии 0,1 м от конца консоли:

$$f_3 = W_{\text{огр.н}} L_1^2 (3L - L_1) / 6EI_{\text{изг}} = (15,3 \cdot 90^2) \times ((3 \cdot 100) - 90) / (6 \cdot 175000 \cdot 9000) = 0,0028 \text{ см};$$

– максимальный прогиб составит:

$$f_{\text{max}} = f_1 + f_2 + f_3 = 0,019 + 0,0093 + 0,0028 = 0,032 \text{ см}.$$

3. Допустимый прогиб для элементов лестниц в соответствии с СП 20.13330.2016 [12, пп. 2, а, 3 и примечание 1 табл. Д.1] составляет $f_u = 2L / 120 = 2 \cdot 100 / 120 = 1,66 \text{ см}$, что намного больше $f_{\text{max}} = 0,032 \text{ см}$, т. е. деформации ступеней от изгиба соответствуют требованиям действующих норм.

Выполним проверку прочности ступеней на кручение в соответствии с предпосылками Ф. Литгла для плоских ступеней [14] (рис. 5).

Формулы Ф. Литгла используют безразмерный коэффициент c , зависящий от характера передачи нагрузок от одной ступени к другой. В более ранней статье С. Прайс и Х. Роджерс [15] соответствующий коэффициент (обозначенный у этих авторов как $k_{\text{ген}}$) в общем случае принят равным 0,75. Ф. Литгл указывает, что по результатам его физических испытаний в общем случае получен $c = 0,85$. Согласно Б. Риго [16] данное

значение хорошо соотносится с численным экспериментом при помощи метода дискретных элементов (МДЭ). В расчет принимаем $c = 0,85$.

Отметим, что при помощи этого коэффициента возможно также учитывать треснувшие, т. е. исключенные из работы участки ступеней. В примере, приведенном у С. Прайс и Х. Роджерс [15], для ступени, расположенной непосредственно над треснувшей поперечно на расстоянии $1/4$ выноса консоли, данный коэффициент равен $c = 0,25$. При этом остальные ступени без трещин будут иметь стандартный коэффициент c , приведенный выше.

Ширина ступени b в формулах Ф. Литтла принята без учета валика и надвигки ступеней друг на друга. Предполагаем, что все ступени марша загружены равномерно кратковременной нагрузкой. Нумерация ступеней в марше — сверху вниз.

Для справки приведем расчет вертикальной реакции под нижней ступенью марша для случая, когда требуется рассчитать конструкции площадки, на которую опирается рассматриваемый марш:

$$R_n = \left[\sum_{i=1}^n P_i + nW \right] / 2c =$$

$$= [10 \cdot 1,08 + 10 \cdot 1,7] / (2 \cdot 0,85) = 16,36 \text{ кН.}$$

Для справки приведем расчет вертикальной реакции в заделке нижней ступени марша для случая, когда требуется выполнить проверку кладки стены, в месте заделки:

$$R_{Wn} = (P_n + W)(1 - 1/2c) =$$

$$= (1,08 + 1,7)(1 - 0,5 \cdot 0,85) = 1,6 \text{ кН} = 163,1 \text{ кг.}$$

1. Определим крутящий момент в заделке нижней ступени:

$$T_n = \left[\left(\sum_{i=1}^{n-1} P_i + (n-1)W \right) / c + (P_n + W) / 2c \right] \times$$

$$\times (b/2) = [((10-1) \cdot 1,08 + (10-1) \cdot 1,7) / 0,85 +$$

$$+ (1,08 + 1,7) / (2 \cdot 0,85)] (0,32 / 2) = (10-1 + 1/2) \times$$

$$\times (1,08 + 1,7)(0,32/2) / 0,85 = 4,98 \text{ кНм} = 50 \text{ 765 кгсм.}$$

2. Для ступени прямоугольного сечения определяем по таблице, приведенной у А. А. Уманского [17, с. 372], безразмерный коэффициент ξ для расчета на кручение (принимая, что b — это длинная сторона прямоугольника, а h — короткая):

– соотношение сторон ступени $b/h = 32/15 = 2,133$;

– по интерполяции определяем безразмерный коэффициент $\xi = 0,533$.

3. Определим момент сопротивления сечения ступени при кручении:

$$W_k = \xi h^3 = 0,533 \cdot 15^3 = 1798,87 \text{ см}^3.$$

4. Наиболее опасной точкой сечения является середина верхней поверхности ступени, где возникает максимальное касательное напряжение от кручения:

$$\tau = T_n / W_k = 50 \text{ 765} / 1798,87 = 28,23 \text{ кг/см}^2 =$$

$$= 2,77 \text{ МПа.}$$

В этой же точке возникает максимальное нормальное напряжение от изгиба σ , определенное ранее.

В уровне нейтральной оси касательные напряжения от кручения несколько меньше, чем в верхней и нижней точке сечения ступени [17, с. 372]. В этом уровне добавляются касательные напряжения от перерезывающей силы $Q = R_{Wn}$ (рассчитываются по формуле $\tau_Q = Qh^2 / 8I_{изг.}$ [17, с. 212]). Однако сумма описанных касательных напряжений для рассматриваемой ступени остается меньше значения $\tau = 2,77 \text{ МПа}$.

5. Для определения допустимого соотношения касательных и нормальных напряжений в наиболее опасной точке выполним построение паспорта прочности расчетным методом в соот-

ветствии с приложением 2 ГОСТ 21153.8—88 [18] (правило знаков в данном ГОСТе — сжатие положительное, растяжение — отрицательное):

– определяем соотношение безразмерных радиусов предельных кругов Мора q_2 и q_1 :

$$q_2 / q_1 = \sigma_{сж} / \sigma_p = 91,9 / 3,06 = 30;$$

– находим значения q_2 и $K_1 + q_1$ из табл. 3 ГОСТ 21153.8—88 [18]:

$$q_2 = 0,0363; K_1 + q_1 = 0,0024;$$

– определяем значение параметра формы огибающей a :

$$a = \sigma_{сж} / 2q_2 = 91,9 / (2 \cdot 0,0363) = 1265,84 \text{ МПа};$$

– определим параметр переноса начала координат σ_0 :

$$\sigma_0 = a (K_1 + q_1) = 1265,84 \cdot 0,0024 = 3,04 \text{ МПа};$$

– вычислим безразмерную координату K для напряжения изгиба, вычисленного ранее:

$$K = (\sigma + \sigma_0) / a = (-1,52 + 3,04) / 1265,84 = 0,0012;$$

– вычислим безразмерную координату l :

$$l = 0,73 \left(\frac{K^2}{K^2 + 1} \right)^{3/8} = 0,73 \left(\frac{0,0012^2}{0,0012^2 + 1} \right)^{3/8} = 0,0047;$$

– предельное касательное напряжение в данной точке будет равно:

$$\tau_{пред} = la = 0,0047 \cdot 1265,84 = 5,94 \text{ МПа}.$$

6. Определим коэффициент запаса:

$k = \tau_{пред} / \tau = 5,94 / 2,77 = 2,14$, что меньше рекомендованного $k = 3$.

Если бы для определения временного сопротивления на изгиб мы руководствовались коэффициентами перехода по М. П. Субботину [5, с. 112], то предельное касательное напряжение было бы чуть больше и составило $\tau_{пред} = 91,9 \cdot 1/14 = 6,56$ МПа. Однако данное значение несколько выше полученного по действующему ГОСТ 21153.8—88 [18].

В подобных случаях, когда расчеты показывают коэффициент запаса $k < 3$, необходимо рассмотреть возможность проведения натуральных испытаний марша.

Выполним проверку деформативности ступени при кручении в соответствии с предпосылками Ф. Литгла для плоских ступеней [14].

1. Для ступени прямоугольного сечения определим по таблице, приведенной у А. А. Уманского [17, с. 372], безразмерный коэффициент η для расчета на кручение (принимая, что b — это длинная сторона прямоугольника, а h — короткая):

– соотношение сторон ступени $b / h = 32 / 15 = 2,133$;

– по интерполяции определим безразмерный коэффициент $\eta = 0,501$.

2. Определим момент инерции сечения ступени при кручении:

$$I_k = \eta h^4 = 0,501 \cdot 15^4 = 25\,363,12 \text{ см}^4.$$

3. Для определения максимального вертикального перемещения $\delta_{(v)}$ необходимо просуммировать перемещения всех ступеней в марше $\Delta_{(v)}$, для чего нужно определить полные углы закручивания каждой ступени по формуле $\varphi_i = T_{ин} L / G I_k$.

Нормативное значение крутящего момента в i -ой ступени вычисляется по формуле:

$$T_{ин} = \left[\left(\sum_{i=1}^{i-1} P_{ин} + (i-1)W_{н} \right) / c + (P_{ин} + W_{н}) / 2c \right] \times (b / 2).$$

Перемещение отдельной ступени вычисляется по формуле $\Delta_{(v)} = h - h \cos \varphi_i + b \varphi_i$.

Результаты вычислений для удобства сведены в табличную форму (см. таблицу).

4. Допустимый прогиб для элементов лестниц в соответствии с СП 20.13330.2016 [12, пп. 2, а, 3 и примечание 1 табл. Д.1] составляет $f_u = 2L / 120 = 2 \cdot 100 / 120 = 1,66$ см.

Консервативно просуммировав прогиб от изгиба $f_{max} = 0,032$ см и вертикальное перемещение от кручения $\delta_{(v)} = 0,444$ см, получаем суммарное перемещение от изгиба с кручением, равное $0,032 + 0,444 = 0,476$ см, что меньше допустимого прогиба $f_u = 1,66$ см, т. е. деформации ступеней от

Расчет вертикальных перемещений ступеней от кручения

| Номер ступени (сверху вниз) | Крутящий момент $T_{ин}$, кНм | Крутящий момент $T_{ин}$, кгсм | Вынос консоли L , см | Модуль сдвига G , кг/см ² | Момент инерции при кручении I_k , см ⁴ | Полный угол закручивания φ , радиан | Перемещение ступени $\Delta_{(n)}$, см |
|--|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|--|---|---|---|
| 1 | 0,229 | 2331 | 100 | 66287 | 25363,12 | 0,00014 | 0,0044 |
| 2 | 0,686 | 6994 | | | | 0,00042 | 0,0133 |
| 3 | 1,144 | 11 657 | | | | 0,00069 | 0,0222 |
| 4 | 1,601 | 16 319 | | | | 0,00097 | 0,0311 |
| 5 | 2,058 | 20 982 | | | | 0,00125 | 0,0399 |
| 6 | 2,516 | 25 645 | | | | 0,00153 | 0,0488 |
| 7 | 2,973 | 30 308 | | | | 0,00180 | 0,0577 |
| 8 | 3,431 | 34 970 | | | | 0,00208 | 0,0666 |
| 9 | 3,888 | 39 633 | | | | 0,00236 | 0,0755 |
| 10 | 4,345 | 44 296 | | | | 0,00263 | 0,0844 |
| Максимальное вертикальное перемещение ступеней $\delta_{(n)}$, см | | | | | | | 0,444 |

изгиба с кручением соответствуют требованиям действующих норм.

Заключение

Приведенный выше пример базируется на аналитических методах расчета бескосоурных каменных лестниц.

При анализе результатов подобных расчетов целесообразно учитывать имеющиеся запасы, обусловленные принятой методикой. А именно:

1. Метод расчета по допускаемым напряжениям является более консервативным по сравнению с методом расчета по предельным состояниям [19, с. 17].

2. При проверке ступеней на прочность расчетные значения временных нагрузок назначались с учетом коэффициентов надежности по нагрузке, применяемых для расчета по предельным состояниям. Для расчета по допускаемым напряжениям в период возведения подобных конструкций использовались только нормативные значения временных нагрузок.

3. Временные нагрузки приложены по наимудшему сценарию по всей площади марша, что на практике реализуется крайне редко.

4. Принятые физико-механические свойства камня взяты по справочным данным и уточня-

ются проведением серий измерений неразрушающими или разрушающими методами.

Анализ результатов расчета подтверждает выводы Ф. Литтла [14] и Б. Риго [16], что деформации бескосоурных каменных лестниц в общем случае невелики, а определяющим критерием для оценки их работоспособности является прочность ступеней.

Вычисление моментов сопротивления и моментов инерции сечения ступеней, отличного от прямоугольного, возможно при помощи имеющихся программных комплексов, например модуля Консул пакета SCAD Office. При назначении расчетного сечения необходимо проанализировать наличие вставок и/или домастиковок. В общем случае они являются ослаблением сечения ступени [14].

Список источников

1. Вебер М. Д. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 1 / М. Д. Вебер, А. В. Кузнецов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2025. — Т. 22. — № 2. — С. 509–530.

2. Приложение к приказу Минстроя РФ № 1056/пр от 31.07.2017. Сборник № 4. Реставрация и воссоздание конструкций и декора из естественного камня. Приложение 3.

3. Харьюзов Л. С. Путиловский камень (плитчатый известняк) как объект реставрации в памятниках архитектуры: учеб. пособие / Л. С. Харьюзов, А. Г. Булах, А. И. Савченко; науч. ред. А. Г. Булах. — СПб.: Изд. Дом С.-Петерб. ун-та, 2012. — 52 с.
4. Лямин Н. Н. Естественные каменные строительные материалы / Н. Н. Лямин. — СПб.: Типография П. П. Сойкина, 1911. — Вып. I. — 74 с.
5. Субботин М. П. Строительное камневедение (технология естественных строительных камней): с приложением геологии строительного камня геолога Л. Е. Наливайко / М. П. Субботин. — Харьков: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. — 272 с.
6. Карташов Ю. М. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев, А. Б. Фадеев. — М.: Недра, 1979. — 269 с.
7. Беликов Б. П. Упругие и прочностные свойства горных пород (с приложением таблиц физико-механических констант главнейших типов горных пород СССР) / Б. П. Беликов // АН СССР. Труды института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — Вып. 43. — С. 47–110.
8. Беликов Б. П. Облицовочный камень и его оценка / Б. П. Беликов, В. П. Петров. — М.: Изд-во Наука, 1977. — 138 с.
9. Беликов Б. П. Природные каменные облицовочные материалы (методы их оценки, изучения и ресурсы) / Б. П. Беликов, М. Б. Григорович, В. П. Петров, С. П. Шоблов // Серия «Неметаллические полезные ископаемые». — М.: ВИНТИ, 1975. — Т. 4. — 123 с.
10. Ржевский В. В. Физико-технические параметры горных пород / В. В. Ржевский. — М.: Изд-во Наука, 1975. — 210 с.
11. СП 15.13330.2020 «СНиП II-22—81* Каменные и армокаменные конструкции». — М.: Минстрой России, 2020.
12. СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07—85* Нагрузки и воздействия». — М.: Стандартинформ, 2018.
13. Heyman J. The mechanics of masonry stairs // Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. — Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995. — P. 259–265.
14. Little Ph. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs / Ph. Little, H. Hough, E. Mullarkey // IStructE. The Structural Engineer. — 2009. — Iss. 87(8). — Pp. 26–33.
15. Price S. Stone cantilevered staircases / S. Price, H. Rogers // IStructE. The Structural Engineer. — 2005. — Iss. 83(2). — Pp. 29–36.
16. Rigo B. Discrete element analysis of stone cantilever stairs / B. Rigo, K. Bagi // Meccanica. — 2018. — Iss. 53. — Pp. 1571–1589.
17. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический / Под ред. А. А. Уманского. — М.: Стройиздат, 1972. — 599 с.
18. ГОСТ 21153.8—88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. — М.: Издательство стандартов, 1986.
19. Розенблюмас А. М. Каменные конструкции / А. М. Розенблюмас. — М.: Высшая школа, 1964. — 302 с.

Дата поступления: 08.06.2025

Решение о публикации: 02.08.2025

Контактная информация:

ВЕБЕР Михаил Давидович — ведущий инженер-конструктор; mischaweber@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович —

канд. техн. наук, декан факультета

«Промышленное и гражданское строительство»;

akuznetsov@pgups.ru

On Restoring Cantilever Stone Staircases in the Architecture of St. Petersburg. Part 2. How to Calculate a Straight Flight Staircase with Plane Treads

M. D. Veber¹, A. V. Kuznetsov²

¹Inforsproekt LLC, 19, Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Veber M. D. Kuznetsov A. V. On Restoring Cantilever Stone Staircases in the Architecture of St. Petersburg. Part 2. How to Calculate a Straight Flight Staircase with Plane Treads // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 739–749. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-739-749

Summary

Purpose: To provide a comprehensive overview of the stone cantilever stairs. **Materials and methods:** A comprehensive archival investigation was undertaken. A thorough analysis and comparison of extant scientific and practical research in this field was conducted. **Results:** Adequate data has been collated for the purpose of conducting a structural analysis of extant structures. It is recommended that the experience of designing, building and operating the object of research be taken into account. **Practical significance:** The findings of this research will provide designing engineers with the calculation tools necessary to assess valuable historical objects.

Keywords: Stone structures, cantilever stairs, hanging/cantilever stairs, inspection, reconstruction, restoration, verification calculations, sample calculations.

References

1. Veber M. D., Kuznetsov A. V. K voprosu vosstanovleniya kamennykh beskosournykh lestnits v arkhitekture Sankt-Peterburga. Chast' 1 [On the issue of restoration of stone stringerless stairs in the architecture of St. Petersburg. Part 1]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering]. 2025, vol. 22, Iss. 2, pp. 509–530.

2. *Prilozhenie k prikazu Ministroya RF № 1056/pr ot 31.07.2017. Sbornik № 4. Restavratsiya i vossozhdanie konstruksiy i dekora iz estestvennogo kamnya. Prilozhenie 3* [Appendix to the order of the Ministry of Construction of the Russian Federation № 1056/pr of July 31, 2017. Collection № 4. Restoration and recreation of structures and decor from natural stone. Appendix 3].

3. Khar'yuzov L. S., Bulakh A. G., Savchenok A. I.; nauch. red. A. G. *BulakhPutilovskiy kamen' (plichatyy*

izvestnyak) kak ob"ekt restavratsii v pamyatnikakh arkhitektury: ucheb. posobie [Putilovsky stone (flaky limestone) as an object of restoration in architectural monuments: textbook]. St. Petersburg: Izd. Dom S.-Peterb. un-ta Publ., 2012, 52 p.

4. Lyamin N. N. *Estestvennye kamennye stroitel'nye materialy* [Natural stone building materials]. St. Petersburg: Tipografiya P. P. Soykina, 1911, Iss. 1, 74 p.

5. Subbotin M. P. *Stroitel'noe kamnevedenie (tehnologiya estestvennykh stroitel'nykh kamney): s prilozheniem geologii stroitel'nogo kamnya geologa L. E. Nalivayko* [Construction stone science (technology of natural building stones): with an appendix on the geology of building stone by geologist L. E. Nalivaiko]. Khar'kov: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo Ukrainy Publ., 1935, 272 p.

6. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Prochnost' i deformiruemost' gornyykh porod*

[Strength and deformability of rocks]. Moscow: Nedra Publ., 1979, 269 p.

7. Belikov B. P. Uprugie i prochnostnye svoystva gornyx porod (s prilozheniem tablits fiziko-mekhanicheskikh konstant glavneyshikh tipov gornyx porod SSSR) [Elastic and strength properties of rocks (with appendix of tables of physical and mechanical constants of the main types of rocks of the USSR)]. *AN SSSR. Trudy instituta geologii rudnykh mestorozhdeniy, petrografii, mineralogii i geokhimii* [USSR Academy of Sciences. Transactions of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry]. Moscow: AN SSSR Publ., 1961, Iss. 43, pp. 47–110.

8. Belikov B. P., Petrov V. P. *Oblitsovochnyy kamen' i ego otsenka* [Facing stone and its assessment]. Moscow: Nauka Publ., 1977, 138 p.

9. Belikov B. P., Grigorovich M. B., Petrov V. P., Shoblov S. P. Prirodnye kamennye oblitsovochnyye materialy (metody ikh otsenki, izucheniya i resursy) [Natural stone facing materials (methods of their assessment, study and resources)]. *Seriya "Nemetallicheskie poleznye iskopaemye"* [Series "Non-metallic useful minerals"]. Moscow: VINITI Publ., 1975, vol. 4, 123 p.

10. Rzhavskiy V. V. *Fiziko-tekhnicheskie parametry gornyx porod* [Physical and technical parameters of rocks]. Moscow: Nauka Publ., 1975, 210 p.

11. *SP 15.13330.2020 "СNiP II-22—81* Kamennye i armokamennye konstruksii"* [SP 15.13330.2020 "SNiP II-22—81* Stone and reinforced stone structures"]. Moscow: Minstroy Rossii Publ., 2020.

12. *SP 20.13330.2016 "СNiP 2.01.07—85* Nagruzki i vozdeystviya"* [SP 20.13330.2016 "SNiP 2.01.07-85* Loads and Impacts"]. Moscow: Standartinform Publ., 2018.

13. Heyman J. The mechanics of masonry stairs. Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics,

Repairs and Restoration. Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995, pp. 259–265.

14. Little Ph., Hough H., Mullarkey E. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs. *IStructE. The Structural Engineer*, 2009, Iss. 87(8), pp. 26–33.

15. Price S., Rogers H. Stone cantilevered staircases. *IStructE. The Structural Engineer*, 2005, Iss. 83(2), pp. 29–36.

16. Rigo B., Bagi K. Discrete element analysis of stone cantilever stairs. *Meccanica*, 2018, Iss. 53, pp. 1571–1589.

17. *Spravochnik proektirovshchika promyshlennykh, zhilykh i obshchestvennykh zdaniy i sooruzheniy. Raschetno-teoreticheskiy; zod red. A. A. Umanskogo* [Handbook of the designer of industrial, residential and public buildings and structures. Calculation and theoretical; ed. A. A. Umansky]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1972, 599 p.

18. *GOST 21153.8—88. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri ob'emnom szhatii* [GOST 21153.8—88. Rocks. Method for determining the ultimate strength under volume compression]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1986.

19. Rozenblyumas A. M. *Kamennye konstruksii* [Stone structures]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1964, 302 p.

Received: June 08, 2025

Accepted: August 02, 2025

Author's information:

Mikhail D. VEBER — Senior Designing Engineer;
mischaweber@mail.ru

Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering,
Dean of the Department "Industrial and Civil
Construction"; akuznetsov@pgups.ru

УДК 624.046.2

Интеграция BIM-модели стойки опоры с расчетом по диаграммам предельных состояний

Д. В. Боль, С. Е. Свинцов, А. П. Ледяев

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

Для цитирования: Боль Д. В., Свинцов С. Е., Ледяев А. П. Интеграция BIM-модели стойки опоры с расчетом по диаграммам предельных состояний // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 750–760. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-750-760

Аннотация

Интеграция расчетных модулей с программами информационного моделирования (BIM) является актуальным направлением цифровизации проектных процессов в строительстве. На сегодняшний день отсутствуют широко внедренные решения, обеспечивающие полноценный обмен инженерными данными между BIM-моделью и расчетными модулями без участия промежуточных преобразователей или ручного ввода. **Цель:** Экспериментальная проверка возможности односторонней интеграции цифровой информационной модели (ЦИМ), построенной в среде «nanoCAD BIM Строительство», с расчетным веб-приложением «Диаграммы предельных состояний» на основе использования внешнего источника данных в формате Excel. **Методы:** Включают инженерное моделирование, параметризацию цифровой модели железобетонного элемента, применение табличного структурирования данных, автоматизированную передачу информации между системами, а также сравнительный и визуальный анализ точности и устойчивости результатов. Основу подхода составляют принципы совместимости форматов, без применения программных API и скриптовой интеграции. **Результаты:** Показали, что передача параметров геометрии, материалов и армирования из BIM-модели в расчетную систему обеспечивает полную воспроизводимость расчетной диаграммы без искажений и с устранением типовых ошибок ввода. Выявлено снижение временных затрат в два раза по сравнению с ручным вводом. **Практическая значимость:** Состоит в возможности интеграции предложенного подхода в реальные проектные процессы и в потенциале его развития для организации двустороннего обмена данными между BIM-моделями и расчетными модулями в рамках цифровых двойников строительных конструкций.

Ключевые слова: Технологии информационного моделирования (ТИМ), Building Information Modeling (BIM), цифровая информационная модель, интеграция программного обеспечения, параметрическое моделирование, диаграммы предельных состояний, диаграммы взаимодействия.

Введение

Интеграция расчетных моделей и цифровых информационных моделей (ЦИМ) предполагает осуществление связи между моделями для передачи данных. В настоящий момент полноценная интеграция между моделями не реализована ни в каком зарубежном или отечественном программном обеспечении [1, 2] и представлена в боль-

шинстве случаев упрощенным экспортом геометрии из ЦИМ в один или несколько различных расчетных комплексов. Тем не менее интеграция расчетных моделей и ЦИМ играет ключевую роль в повышении производительности труда на этапе проектирования с применением технологий информационного моделирования (ТИМ), а также является важным элементом создания

цифровых двойников сооружений [3, 4]. С точки зрения повышения производительности труда данная интеграция позволяет сократить трудовые затраты, связанные с созданием моделей с нуля, и минимизировать ошибки передачи данных между различным программным обеспечением [2]. С точки зрения создания цифровых двойников сооружений интеграция моделей требуется для решения аналитических задач, связанных с использованием цифровых двойников в той же среде, в которой консолидируются данные из системы мониторинга и информация из ЦИМ.

На практике интеграция может быть реализована несколькими способами [3]:

- односторонний экспорт данных (из ЦИМ в расчетную модель или наоборот);
- создание единой гибридной модели;
- динамическая связь между моделями через внешний источник данных.

Наибольший интерес представляет последний подход, так как он обеспечивает динамическое обновление информации и гарантирует ее полноту, что критически важно как при проектировании с применением ТИМ, во время которого появляется новая информация, требующая отражения в моделях, так и для цифровых двойников, требующих постоянного информационного взаимодействия между своими составными элементами для обеспечения их полноценного функционирования, включающего в себя консолидацию актуальных данных и инструменты для анализа и прогнозирования [3].

Необходимо отметить, что расчетная модель может быть представлена не только конечно-элементной моделью сооружения или отдельного элемента, но и модулем или набором модулей для выполнения задач расчета отдельных элементов, сечений и т. п. При этом способы реализации интеграции моделей остаются теми же.

Так, для расчета прочности железобетонных элементов применяется способ, основанный на

построении диаграмм предельных состояний, отражающих граничные значения усилий, которые может воспринимать сечение при различных сочетаниях продольной силы и изгибающего момента. Этот подход позволяет перейти от частных проверок по отдельным критериям прочности к более универсальной и визуально интерпретируемой модели оценки несущей способности [5, 6].

Диаграмма предельных состояний представляет собой расчетную область, ограничивающую допустимые значения усилий в плоскости $N - M$ (продольная сила — изгибающий момент). Она строится на основе прочностных характеристик материалов, геометрии сечения и схемы армирования и позволяет в рамках единого графического решения учесть как нормальные, так и эксцентрично приложенные нагрузки. В инженерной практике такие диаграммы используются не только для проверки отдельных сечений, но и для подбора и оптимизации армирования [7], сравнения различных проектных решений, оценки предельного состояния конструкций при температурных нагрузках [8].

Одним из преимуществ метода является его пригодность для включения в расчетные модули, ориентированные на визуализацию и автоматизированную проверку сечений [9]. Такой подход особенно актуален в контексте информационного моделирования зданий и сооружений, где требуется увязка графических и аналитических представлений объекта. При этом диаграммы предельных состояний могут служить не только инструментом статической проверки, но и основой для формирования аналитических правил в рамках цифрового двойника конструкции.

В контексте данной работы расчетный модуль «Диаграммы предельных состояний» [10] реализует построение таких диаграмм для железобетонных элементов мостовых сооружений в соответствии с требованиями СП 35.13330.2011

на базе параметров сечения, заданных пользователем, с возможностью экспорта результатов в универсальном табличном формате. Это делает возможным их дальнейшее использование в цифровых информационных моделях, созданных в среде «nanoCAD BIM Строительство». Таким образом, рассматриваемый расчетный модуль можно интерпретировать как связующее звено между инженерной аналитикой и цифровым моделированием, что соответствует современной тенденции интеграции расчетных и информационных моделей в едином цифровом контуре.

Основные цели исследования:

1. Практическая проверка возможности осуществления связи между расчетной моделью и ЦИМ через внешний источник данных в рамках отечественного ПО для информационного моделирования.

2. Подтверждение функциональности программы «Диаграммы предельных состояний» и расчетных веб-приложений в целом в части экспорта и передачи результатов расчетов для их дальнейшего использования в качестве исходных данных для автоматизированного формирования ЦИМ.

Методы

Расчетный модуль «Диаграммы предельных состояний» [10] представляет собой специализированное веб-приложение, предназначенное для расчета железобетонных сечений, находящихся под действием продольной силы и изгибающего момента по требованиям СП 35.13330.2011. Его работа основана на численной реализации деформационной модели, что позволяет учитывать нелинейную работу материалов на стадии предельного состояния без итерационных вычислений.

Пользователь задает геометрию сечения, характеристики арматуры, класс бетона и прочностные параметры, после чего производится автоматизированный расчет несущей способ-

ности в виде предельной кривой в координатах «продольная сила — изгибающий момент». Диаграмма формируется как совокупность точек, каждая из которых соответствует конкретному положению нейтральной оси и определенному эксцентриситету.

Одной из ключевых особенностей модуля является возможность импорта расчетных данных из табличного файла формата *Microsoft Excel*. Структура шаблонного файла ориентирована на машинную обработку, что облегчает внедрение результата в автоматизированные проектные процессы.

Цифровая информационная модель представляет собой объектно-ориентированную модель. Это означает, что данные в ней представлены в виде взаимосвязанных объектов с геометрическими и атрибутивными характеристиками. Таким образом, ЦИМ можно условно разделить на три уровня: геометрический — содержащий трехмерную информацию об объеме, форме и положении объектов в пространстве; семантический — содержащий негеометрическую информацию об объектах, например наименования, типы, материалы и их характеристики; реляционный — определяющий связи между объектами в модели.

Архитектура ЦИМ открывает широкие возможности для параметризации, что необходимо для осуществления передачи данных в модель с последующим автоматическим внесением в нее изменений.

Важно отметить, что общие принципы архитектуры ЦИМ не зависят от применяемого программного обеспечения, что позволяет адаптировать решения к различным проприетарным форматам моделей.

Выбранный в данной работе **механизм передачи данных** из расчетного модуля для формирования ЦИМ элемента в среде «nanoCAD BIM Строительство» основано на взаимодействии программного обеспечения с помощью внешнего

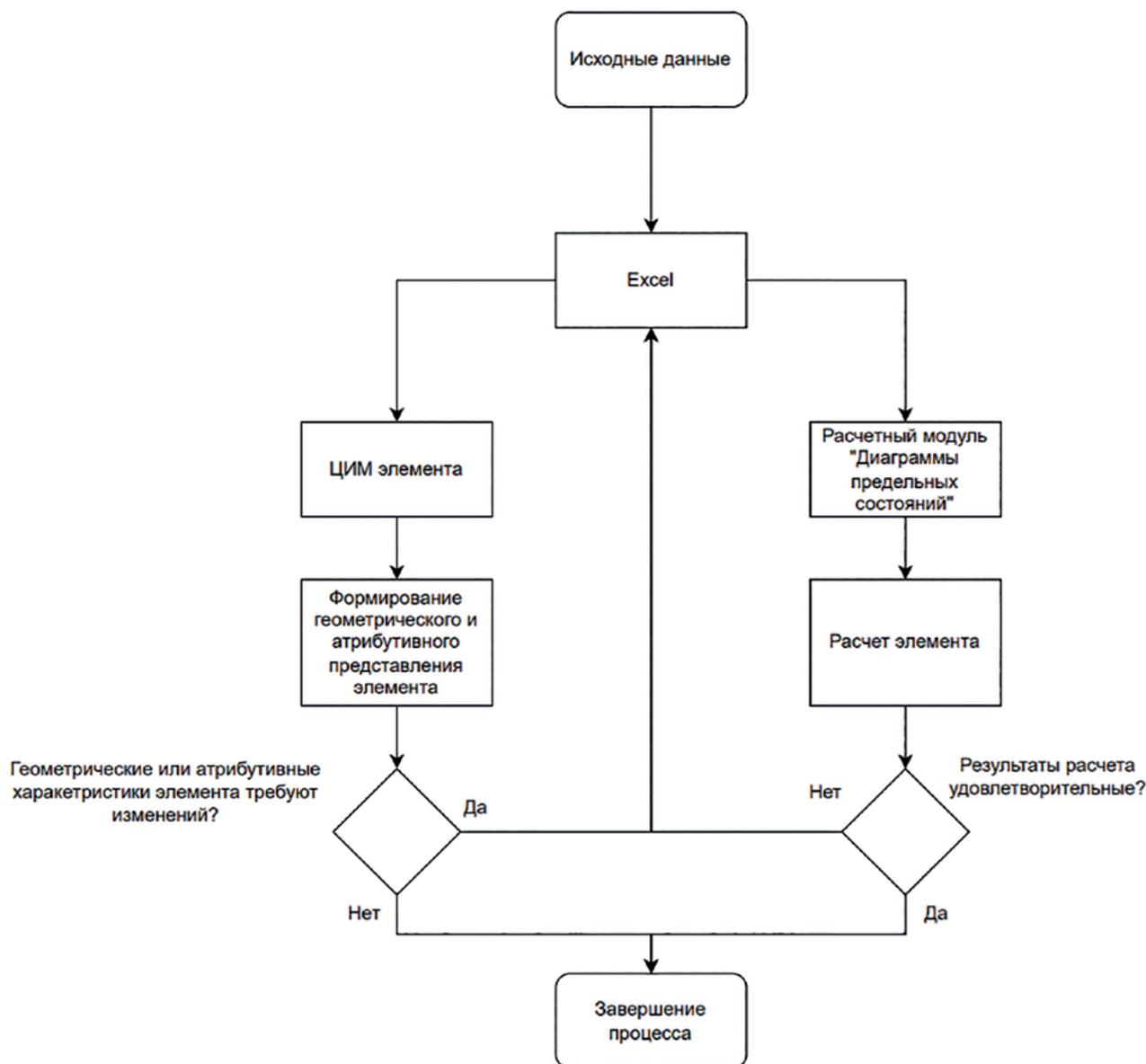


Рис. 1. Схема передачи данных

источника данных, в данном случае представленного таблицей в формате *xlsx*.

Данный способ позволяет осуществлять динамическую взаимную связь между ЦИМ и расчетным модулем. Таким образом, в данном случае не важна последовательность создания модели и выполнения расчета. Взаимное обновление связанных данных происходит в любом случае. Схема механизма передачи данных представлена на рис. 1.

Выбранный способ связи расчетного модуля и ЦИМ не является единственным вариантом инте-

грации с использованием внешнего источника данных и был выбран в данном случае как наиболее оптимальный с точки зрения сложности реализации с учетом возможностей применяемого программного обеспечения. Внешний источник данных может быть также представлен в виде текстового файла для импорта, отдельного интерфейса, алгоритма в среде визуального программирования или любой другой форме представления данных в зависимости от целей интеграции и применяемого программного обеспечения.

Результаты

В рамках проверки работоспособности интеграции между цифровой информационной моделью, разработанной в среде «nanoCAD BIM Строительство», и расчетным модулем «Диаграммы предельных состояний» была реализована передача исходных параметров конструкции в ЦИМ из внешнего источника данных и из ЦИМ в расчетную систему. В качестве исследуемого объекта был принят железобетонный элемент — стойка опоры моста прямоугольного сечения с размерами 400×600 мм, армированная четырьмя продольными стержнями диаметром 32 мм, размещенными симметрично по углам сечения. Применен класс бетона В30 и арматуры А400.

В «nanoCAD BIM Конструкции» были созданы следующие объекты: бетонный элемент стойки и два массива арматурных стержней, расположенных в ней. Данные массивы стержней соответствуют тем, что рассчитываются в рамках модуля «Диаграммы предельных состояний». Созданным элементам были заданы наборы параметров, определяющие их геометрическое и атрибутивное представление, в том числе параметры значения которых предполагается импортировать из внешнего источника данных. Элементы были параметризированы — была установлена зави-

симость между рядом геометрических и атрибутивных характеристик: между расстоянием от центра тяжести арматурных стержней до грани элемента и защитным слоем; защитным слоем, диаметром стержней и расположением стержней в теле элемента; защитным слоем, диаметром, количеством стержней в ряду и шагом.

В шаблоне таблицы в формате *xlsx* были заполнены требуемые характеристики элемента, приведенные выше. Заполненный шаблон представлен на рис. 2. Шаблон таблицы был объединен с аналогичной по форме таблицей, созданной в «nanoCAD BIM Строительство». С помощью встроенных инструментов программы между таблицей «nanoCAD BIM Строительство» и внешним файлом *xlsx* была установлена динамическая связь. Таблица в «nanoCAD BIM Строительство» представлена на рис. 2.

Далее в «nanoCAD BIM Строительство» была создана отдельная таблица, служащая промежуточным звеном между таблицей, связанной с внешним источником данных, и элементом в модели. Данная таблица была связана с ячейками таблицы импорта и с соответствующими атрибутами элемента ЦИМ с помощью инструментов программы, реализующих связь между объектами модели и таблицами. Таблица представлена на рис. 3.

| | A | B | C | D |
|----|---|---|--------------------------------------|------|
| 1 | | | Класс бетона | V30 |
| 2 | | | Класс арматуры | A400 |
| 3 | | | Длина элемента | 2 |
| 4 | | | Тип защемления, коэф. | 1 |
| 5 | | | Высота сечения, м | 0.6 |
| 6 | | | Ширина сечения, м | 0.4 |
| 7 | | | Диаметр арматуры снизу, мм | 32 |
| 8 | | | Расстояние от ц.т. до гр. снизу, мм | 46 |
| 9 | | | Кол-во стержней снизу, шт. | 2 |
| 10 | | | Диаметр арматуры сверху, мм | 32 |
| 11 | | | Расстояние от ц.т. до гр. сверху, мм | 46 |
| 12 | | | Кол-во стержней сверху, шт. | 2 |

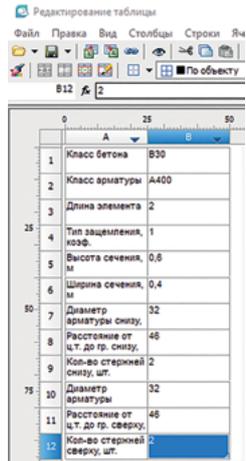
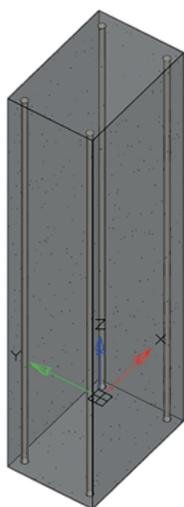


Рис. 2. Заполненный исходными данными шаблон таблицы в формате *xlsx* и таблица для импорта данных в «nanoCAD BIM Строительство»

| | A | B | C |
|----|-----------------------------------|------|---|
| 1 | Класс бетона | B30 | |
| 2 | Класс арматуры | A400 | |
| 3 | Длина элемента, мм | 2000 | |
| 4 | Тип заземления, коэф. | 1 | |
| 5 | Высота сечения, мм | 600 | |
| 6 | Ширина сечения, мм | 400 | |
| 7 | Диаметр арматуры снизу, | 32 | |
| 8 | Расстояние от ц.т. до гр. снизу, | 46 | |
| 9 | Кол-во стержней снизу, шт. | 2 | |
| 10 | Диаметр арматуры | 32 | |
| 11 | Расстояние от ц.т. до гр. сверху, | 46 | |
| 12 | Кол-во стержней сверху, шт. | 2 | |

Рис. 3. Таблица для осуществления связи с элементом модели

При загрузке исходных данных в таблицу для импорта геометрические и атрибутивные характеристики элемента обновляются автоматически. Обновленные геометрические и атрибутивные представления элемента представлены на рис. 4.



| Параметр | Значение |
|---|------------------------|
| 1_СТБФ | |
| Класс бетона | B30 |
| Модуль упругости бетона | 348 |
| Модуль упругости арматуры | 209 |
| Способ определения пластичности | 1 |
| Исполнение | Железобетонная колонна |
| Материал | Бетон B30 B(1)20/14 |
| К.К. Арматура | |
| Класс арматуры | A400 |
| Диаметр арматуры сверху | 32 |
| Диаметр арматуры снизу | 32 |
| Степень защиты | |
| Идентификатор материала | ST 015 |
| Имя материала | Бетон B30 F200/15 |
| Материал | Бетон B30 B(1)20/14 |
| Классификация ИЭС | |
| Класс ИЭС | 36/100 |
| Конструктивная функция | 11000 |
| Расположение | Верх |
| Размеры | |
| Высота | 2000 |
| Длина | 600 |
| Ширина | 400 |
| Свойства | |
| Высота | 2000 |
| Длина | 600 |
| Элементы сечения | |
| Диаметр стержня | 30 |
| Диаметр стержня по толщине | 30 |
| Диаметр стержня сверху | 30 |
| Объем | |
| Расстояние от ст. 1 | 46 |
| Расстояние от ст. 2 | 46 |
| Шаг арматуры | 200 |
| Шаг арматуры 2 | 200 |
| Остаток от расстояния арматуры с регулированием | 13 |
| Требование к стержням арматуры 1 | 2 |
| Требование к стержням арматуры 2 | 2 |

Рис. 4. Геометрическое представление элемента после загрузки обновленных данных и атрибутивное представление элемента после загрузки обновленных данных

После установки связи атрибутов элемента с ячейками таблицы управление элементом производится через таблицу. Сама таблица может быть экспортирована в *Excel*.

На следующем этапе *Excel*-файл с исходными данными стойки был обработан и считан расчетным модулем «*Диаграммы предельных состояний*». Для этого в модуле была реализована функция загрузки входных параметров из внешнего источника с верификацией формата данных и их единиц измерения. Данные автоматически распознавались и подставлялись в поля формы, исключая необходимость ручного ввода. Рабочее окно программы «*Диаграммы предельных состояний*» представлено на рис. 5.

После загрузки параметров был выполнен расчет диаграммы предельных состояний. Результаты включали координаты точек граничной кривой в плоскости $N - M$, которые возможно экспортировать в формате *Excel*, а также графическое отображение расчетной области. Полученная диаграмма была построена на основе тех же параметров, что использовались в ЦИМ, без ручной коррекции.

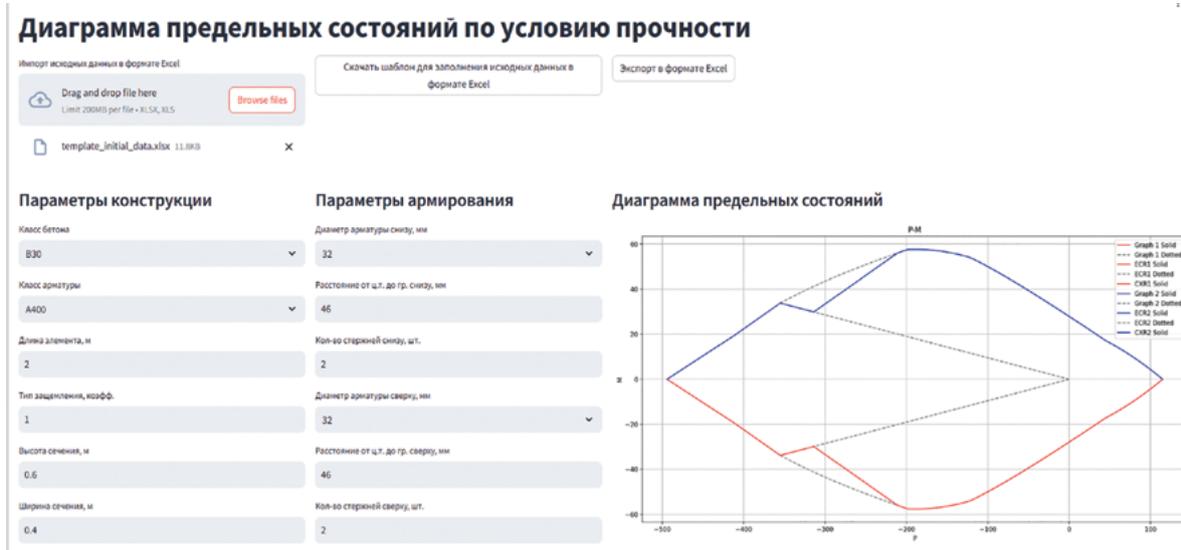


Рис. 5. Рабочее окно программы «Диаграммы предельных состояний»

В случае изменения исходных данных в таблице изменение ЦИМ происходит автоматически. Перерасчет несущей способности в расчетном модуле производится при загрузке обновленного файла в веб-приложение.

Для анализа точности и корректности передачи данных был проведен контроль соответствия выгруженных из «nanoCAD BIM Строительство» значений и тех, что были использованы в расчетах.

Для оценки эффективности автоматизации процесса была выполнена имитация ручного ввода аналогичных данных в расчетный модуль и зафиксированы трудозатраты (см. таблицу).

Сравнение трудозатрат при интеграции параметров

| Этап интеграции | Ручной ввод | Импорт из BIM |
|---|-------------|--------------------------|
| Получение параметров конструкции | — | 2 мин |
| Ввод параметров вручную | 5 мин | — |
| Проверка корректности | 3 мин | 2 мин |
| Время повторного расчета при изменении модели | 2 мин | < 1 мин (автообновление) |
| Общее время | 10 мин | 5 мин |

Анализ

Проведенная практическая реализация интеграции ЦИМ, разработанной в среде «nanoCAD BIM Строительство», с расчетным модулем «Диаграммы предельных состояний» позволила не только подтвердить техническую осуществимость данной связки, но и выявить ряд закономерностей, которые имеют принципиальное значение для оценки ее эффективности и применимости в инженерной практике.

Прежде всего стоит отметить, что корректность передачи параметров конструкции из ЦИМ в расчетную систему была обеспечена при соблюдении требований к структуре выходного *Excel*-файла и единообразию обозначений параметров. Все данные, необходимые для построения диаграммы, — геометрические размеры, характеристики бетона и арматуры, расположение стержней — были переданы автоматически без участия пользователя, что позволило исключить ошибки, связанные с человеческим фактором. При верификации не было зафиксировано ни одного случая расхождения между значениями, использованными в «nanoCAD BIM Строительство» и переданными в расчетный модуль. Это свидетельствует о высокой

степени надежности представленного способа передачи данных.

Сравнение трудозатрат между ручным вводом параметров и автоматизированной интеграцией показало существенное преимущество последнего подхода. Автоматический импорт данных сократил общее время подготовки расчетной задачи в среднем в два раза. Особенно ярко различие проявляется при повторной необходимости выполнения расчета. В случае изменения геометрии сечения или состава армирования обновление данных в ЦИМ и в расчетном модуле производится автоматически.

Преимущество автоматизированного подхода также проявилось в устойчивости к ошибкам. Данный эффект не столь значителен при моделировании и расчете одного элемента, тем не менее возможно масштабирование представленного метода для работы с большим количеством моделируемых и рассчитываемых элементов. В условиях, когда модель включает значительное количество элементов, ручной ввод параметров в ЦИМ и значений в расчетный модуль становится не только трудоемким, но и практически неприемлемым с точки зрения точности. При ручном вводе данных для ЦИМ и расчетного модуля (который дублируется) существует ряд типичных ошибок: неправильное указание единиц измерения, неверное округление значений и пропуски строк в форме расчета и значений параметров в элементах ЦИМ. Во всех этих случаях автоматический импорт устранил потенциальные риски.

Следует отметить и гибкость расчетного модуля, который способен адаптироваться к входным данным, сформированным на основе ЦИМ. Универсальность структуры входного файла (табличный формат *Excel*) позволила обеспечить совместимость без написания специализированного кода, что делает метод применимым не только для работы в «nanoCAD BIM Строительство», но и потенциально в другом ПО для

информационного моделирования, поддерживающем экспорт и импорт параметров в табличном виде.

Однако вместе с тем были зафиксированы ограничения текущей реализации. В частности, взаимодействие осуществляется в одностороннем режиме: расчетный модуль получает данные, но не возвращает результаты напрямую в ЦИМ. Таким образом, результирующая диаграмма пока может быть проанализирована визуально или использована вручную, но результаты расчета не передаются и не отражаются в ЦИМ. Кроме того, устойчивость метода зависит от строгости соблюдения структуры выгрузки: изменение порядка столбцов или строк в *Excel*-файле может привести к сбоям при импорте данных в расчетный модуль.

Тем не менее даже с учетом указанных ограничений можно утверждать, что предложенный подход демонстрирует высокую практическую ценность и технологическую состоятельность. Он позволяет устранить разрыв между этапами информационного моделирования и расчета, интегрировать расчетную логику в цифровой контур проектирования и способствует возможности реализации концепции цифрового двойника на уровне отдельных конструктивных элементов.

Таким образом, анализ подтверждает обоснованность применения автоматизированной интеграции как инструмента повышения точности, надежности и эффективности проектной деятельности при использовании современных систем информационного моделирования и расчетных систем.

Выводы

В ходе выполнения работы была продемонстрирована возможность реализации интеграции расчетного модуля «Диаграммы предельных состояний» с цифровой информационной моделью, разработанной в среде «nanoCAD BIM

Строительство». Отличительной особенностью предложенного подхода стало отсутствие необходимости в использовании стороннего программного обеспечения или разработке промежуточных конвертеров: передача исходных данных осуществлялась посредством экспорта параметров из ЦИМ в универсальный табличный формат, пригодный для прямого чтения расчетным модулем.

Проведенный эксперимент показал, что все основные параметры, необходимые для построения диаграммы предельных состояний, — геометрические характеристики, типы и размеры арматуры, прочностные свойства материалов — успешно передаются в расчетную систему без искажений. Были достигнуты высокая точность и воспроизводимость результатов, а также полное отсутствие ошибок, характерных для ручного ввода данных. Трудозатраты на подготовку входных данных были снижены в два раза по сравнению с традиционным методом, что особенно критично при работе с множеством элементов в составе сложных конструкций.

Интеграция позволила упростить цикл «модель — расчет», сделав его более технологичным, автоматизированным и надежным. Анализ показал, что полученный способ может быть эффективно применен в инженерной практике, в том числе при создании цифровых двойников конструкций, где необходима постоянная связь между геометрической моделью и аналитическим расчетом. Наряду с этим был выявлен ряд ограничений, связанных с односторонним характером передачи данных и необходимостью строгого соблюдения структуры входного файла. Тем не менее они не снижают общей ценности предложенного подхода.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что автоматизированная интеграция расчетных модулей и информационных моделей на базе отечественного программного обеспече-

ния возможна и эффективна, а дальнейшее развитие подобных решений будет способствовать повышению производительности труда, снижению количества ошибок и внедрению принципов сквозной цифровизации в строительной отрасли.

Список источников

1. Ren R. BIM Interoperability for Structure Analysis / R. Ren, J. Zhang, H. Dib // Construction Research Congress. — 2018. — Pp. 470–479.
2. Дитин А. Е. Интеграция информационной модели с расчетными комплексами / А. Е. Дитин, Е. Р. Кирколуп // Ползуновский альманах. — 2025. — № 1. — С. 65–67.
3. Свинцов С. Е. Осуществление динамической связи между информационными и расчетными моделями с помощью внешнего источника исходных данных / С. Е. Свинцов // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: СПбГАСУ, 2025. — С. 402–412.
4. Ma L. Analysis of BIM technology applications in structural design / L. Ma, Y. Huo, Y. Zhang, W. Cheng // Advances in Engineering Innovation. — 2024. — № 14. — Pp. 55–59.
5. Плевков В. С. Особенности расчета прочности нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов с использованием областей относительного сопротивления / В. С. Плевков, И. В. Балдин, Р. А. Плевков // Строительство и реконструкция. — 2017. — № 1. — С. 56–66.
6. Боль Д. В. Составление диаграмм предельных состояний для расчета железобетонных элементов мостовых сооружений / Д. В. Боль, Г. И. Богданов // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2024. — № 4(76). — С. 114–122.
7. Lee H. Optimum RC column reinforcement considering multiple load combinations / H. Lee, M. Aschheim, E. Hernández-Montes, L. Gil-Martín // Structural and Multidisciplinary Optimization. — 2008. — Vol. 36. — Pp. 217–234.
8. Bleyer J. Numerical Yield Design Analysis of High-Rise Reinforced Concrete Walls in Fire Conditions / J. Bleyer, D. T. Pham, P. de Buhan. — 2018.

9. Белокопытова И. А. Арбат — программа для расчета железобетонных строительных конструкций / И. А. Белокопытова, Э. З. Криксунов, М. А. Микитаренко, М. А. Перельмутер // *Архитектура и строительство*. — 2001. — № 4(9). — С. 59–63.

10. Свид. 2024683071 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «*Диаграммы предельных состояний по условию прочности для стержневых железобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения*» / Д. В. Боль. — 2024.

Дата поступления: 18.06.2025

Решение о публикации: 22.07.2025

Контактная информация:

БОЛЬ Дмитрий Викторович — аспирант;
dvsbol1240@gmail.com

СВИНЦОВ Степан Евгеньевич — аспирант;
stiwosv@gmail.com

ЛЕДЯЕВ Александр Петрович — д-р техн. наук, проф.;
ledyaev@yandex.ru

Integration of BIM-Based Pier Model with Limit State Diagram Calculations

D. V. Bol, S. E. Svintsov, A. P. Ledyaev

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

For citation: Bol D. V., Svintsov S. E., Ledyaev A. P. Integration of BIM-Based Pier Model with Limit State Diagram Calculations // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 750–760. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-750-760

Summary

The integration of calculation modules and information modelling (BIM) represents a contemporary trend in the digitalisation of design processes within the construction industry. At present, there is a lack of solutions providing a comprehensive exchange of engineering data between the BIM model and calculation modules without using intermediate converters or manual input. **Purpose:** The experimental verification of the possibility of unilateral integration of a digital information model (DIM) built in the nanoCAD BIM Construction environment with the Limit State Diagrams calculation web application was conducted based on the external data source in Excel format. **Methods:** Engineering modelling, parameterization of a reinforced concrete structural element, data structuring using spreadsheet formats, automated data transfer between systems, and comparative and visual analysis to assess the accuracy and robustness of the results. The approach is based on format compatibility principles eschewing the use of custom APIs or external scripts. **Results:** The transfer of geometric, material, and reinforcement parameters from the BIM model to the analytical module has been demonstrated to ensure complete reproducibility of the calculated diagram, eliminate common input errors, and reduce the time required for data preparation by twofold compared to manual entry. **The practical significance:** The integration of the proposed approach into physical design processes and its potential for organising bilateral data exchange between BIM models and calculation modules within the framework of building structure digital twins have been demonstrated.

Keywords: Information modelling technologies, Building Information Modelling (BIM), Digital Information Model, software integration, parametric modelling, limit state diagrams, interaction diagrams.

References

1. Ren R., Zhang J., Dib H. N. BIM Interoperability for Structure Analysis. Construction Research Congress, 2018, pp. 470–479.
2. Ditin A. E., Kirkolup E. R. Integratsiya informatsionnoy modeli s raschetnyimi kompleksami [Integration of information model with calculation complexes]. *Polzunovskiy al'manakh* [Polzunovsky almanac]. 2025, Iss. 1, pp. 65–67. (In Russian)
3. Svintsov S. E. Osushchestvleniye dinamicheskoy svyazi mezhdu informatsionnymi i raschetnyimi modelyami s pomoshch'yu vneshnego istochnika iskhodnykh dannykh [Implementation of dynamic link between information and calculation models using external data source]. *Informatsionnoye modelirovaniye v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury* [Information modeling in construction and architecture tasks]. St. Petersburg: SPbGASU Publ., 2025, pp. 402–412. (In Russian)
4. Ma L., Huo Y., Zhang Y., Cheng W. Analysis of BIM technology applications in structural design. *Advances in Engineering Innovation*, 2024, Iss. 14, pp. 55–59.
5. Plevkov V. S., Baldin I. V., Plevkov R. A. Osobennosti rascheta prochnosti normal'nykh secheniy zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov s ispol'zovaniem oblastey otnositel'nogo soprotivleniya [Features of strength calculation of normal sections of reinforced concrete bending elements using relative resistance areas]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2017, Iss. 1, pp. 56–66. (In Russian)
6. Bol D. V., Bogdanov G. I. Sostavleniye diagramm predel'nykh sostoyaniy dlya rascheta zhelezobetonnykh elementov mostovykh sooruzheniy [Compilation of limit state diagrams for calculation of reinforced concrete elements of bridge structures]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury* [Scientific journal of construction and architecture]. 2024, Iss. 4(76), pp. 114–122. (In Russian)
7. Lee H., Aschheim M., Hernández-Montes E., Gil-Martín L. Optimum RC column reinforcement considering multiple load combinations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2008, vol. 36, pp. 217–234.
8. Bleyer J., Pham D. T., de Buhan P. Numerical Yield Design Analysis of High-Rise Reinforced Concrete Walls in Fire Conditions, 2018.
9. Belokopytova I. A., Kriksunov E. Z., Mikitarenko M. A., Perel'muter M. A. Arbat — programma dlya rascheta zhelezobetonnykh stroitel'nykh konstruktsiy [Arbat — program for calculation of reinforced concrete construction structures]. *Arkhitektura i stroitel'stvo* [Architecture and construction]. 2001, Iss. 4(9), pp. 59–63. (In Russian)
10. Bol' D. V. *Diagrammy predel'nykh sostoyaniy po usloviyu prochnosti dlya sterzhnevnykh zhelezobetonnykh elementov pryamougol'nogo poperechnogo secheniya* [Limit state diagrams for strength condition of rod reinforced concrete elements with rectangular cross-section]. Svidetel'stvo RF, no. 2024683071, 2024. (In Russian)

Received: June 18, 2025

Accepted: July 22, 2025

Author's information:

Dmitrii V. BOL — Postgraduate Student;

dvbol1240@gmail.com

Stepan E. SVINTSOV — Postgraduate Student;

stiwosv@gmail.com

Aleksande P. LEDYAEV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor; ledyaev@yandex.ru

УДК 627.1

Комплексный подход к снижению аварийности на внутренних водных путях Арктического региона России

Н. А. Волкова^{1,2}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Российская Федерация, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Российская Федерация, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Для цитирования: Волкова Н. А. Комплексный подход к снижению аварийности на внутренних водных путях Арктического региона России // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 761–775. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-761-775

Аннотация

Цель: Анализ аварийности на внутренних водных путях России с акцентом на Арктический регион, выявление ключевых факторов риска и разработка мер по повышению безопасности судоходства.

Методы: Использованы статистический анализ данных за 2007–2024 гг., гидрографическая оценка водных путей, многофакторный анализ причин аварийности, сравнение эффективности современных и традиционных методов навигации. **Результаты:** Выявлены основные типы происшествий: посадки на мель (35%), столкновения (25%), затопления судов (15%). Определены ключевые причины: человеческий фактор (42%), нарушения эксплуатации (28%), износ инфраструктуры (20%), экстремальные погодные условия (10%). **Практическая значимость:** Разработаны рекомендации по модернизации навигационных систем с применением технологий ГЛОНАСС/GPS; созданию сети аварийно-спасательных пунктов; внедрению специализированных программ подготовки экипажей; усилению экологического мониторинга с использованием дронов и датчиков. Реализация предложенных мер позволит снизить аварийность на 30–40% и минимизировать экологический ущерб в Арктическом регионе.

Ключевые слова: Внутренние водные пути, Арктика, аварийность судов, навигационная безопасность.

Введение

Судоходство на внутренних водных путях Арктики сталкивается с уникальными вызовами, обусловленными экстремальными природными условиями и возрастающей антропогенной нагрузкой [1, 2]. В отличие от других регионов России, арктические речные системы характеризуются коротким периодом навигации, сложной ледовой обстановкой и высокой чувствительностью экосистем, что многократно увеличивает потенциальные последствия аварийных ситуаций.

Современные тенденции показывают устойчивый рост интенсивности судоходства в Арктике, связанный с развитием Трансарктического транс-

портного коридора и увеличением объемов перевозок. Однако инфраструктура водных путей, значительная часть которой была создана несколько десятилетий назад, не всегда соответствует современным требованиям безопасности. Особую озабоченность вызывает состояние гидротехнических сооружений, средний возраст которых превышает 35 лет, а степень износа достигает критических значений.

При этом существующие системы навигационного обеспечения и подготовки экипажей зачастую не учитывают специфику арктического судоходства. Климатические изменения, проявляющиеся в увеличении частоты экстремаль-

ных гидрометеорологических явлений, создают дополнительные риски для безопасности судоходства.

В этих условиях особую актуальность приобретает разработка комплексного подхода к обеспечению безопасности, сочетающего современные технические решения, усовершенствованные методы управления и адаптированные к арктическим условиям нормативные требования. Необходимость такого подхода подтверждается анализом динамики аварийности, показывающим устойчивый рост количества инцидентов, особенно с экологическими последствиями.

Проведенное исследование направлено на выявление ключевых факторов аварийности и разработку практических мер по повышению безопасности судоходства с учетом особенностей Арктического региона.

1. Гидрографическая характеристика арктических внутренних водных путей

Арктический регион России обладает развитой сетью внутренних водных путей, играющих ключевую роль в транспортной системе и экономике северных территорий. К числу наиболее значимых водных артерий относятся крупные речные системы: Обь с ее притоками, Енисей, Лена, Печора и Северная Двина, а также участки реки Амур в пределах Арктической зоны. Эти реки отличаются протяженными судоходными участками, однако их эксплуатация осложняется выраженной сезонностью навигации, значительными колебаниями уровней воды и сложными ледовыми условиями.

Гидрологический режим арктических водных путей характеризуется рядом специфических особенностей. Короткий период навигации (от 120 до 180 суток в зависимости от широты) сочетается с экстремальными гидрометеорологическими условиями, включая паводковый режим, интенсивное ледообразование и резкие изменения уров-

ней воды. Эти факторы существенно влияют на безопасность судоходства, требуя разработки специальных подходов к организации транспортного процесса и созданию адаптированной к арктическим условиям инфраструктуры.

Современные климатические изменения вносят дополнительные сложности в эксплуатацию арктических водных путей. Наблюдаемое увеличение неустойчивости ледового покрова, смещение сроков ледостава и вскрытия рек, а также учащение экстремальных гидрологических явлений (паводков, заторов льда) диктуют необходимость совершенствования систем мониторинга и прогнозирования, а также разработки новых технологических решений для обеспечения безопасного судоходства в условиях меняющейся Арктики.

2. Статистика и характер аварийности на арктических водных путях

Анализ данных за последние 18 лет (2007–2024 гг.) свидетельствует о высокой аварийности на внутренних водных путях Арктического региона [3]. Наибольшее количество инцидентов зафиксировано на крупнейших речных системах — Оби, Енисее и Лене, которые являются основными транспортными артериями для снабжения северных территорий. Согласно официальной статистике, на эти три реки приходится около 65% всех зарегистрированных происшествий в Арктической зоне. Особую тревогу вызывает тенденция к увеличению количества аварий с экологическими последствиями, что связано с ростом объемов перевозок нефтепродуктов и других опасных грузов.

Характерным примером серьезного инцидента стало столкновение танкера «Ерофей Хабаров» с баржей на реке Лена в июне 2023 г., в результате которого произошел разлив 82 т бензина. Этот случай наглядно демонстрирует типичные для арктического судоходства риски: сложные гидрологические условия, недостаточную оснащенность

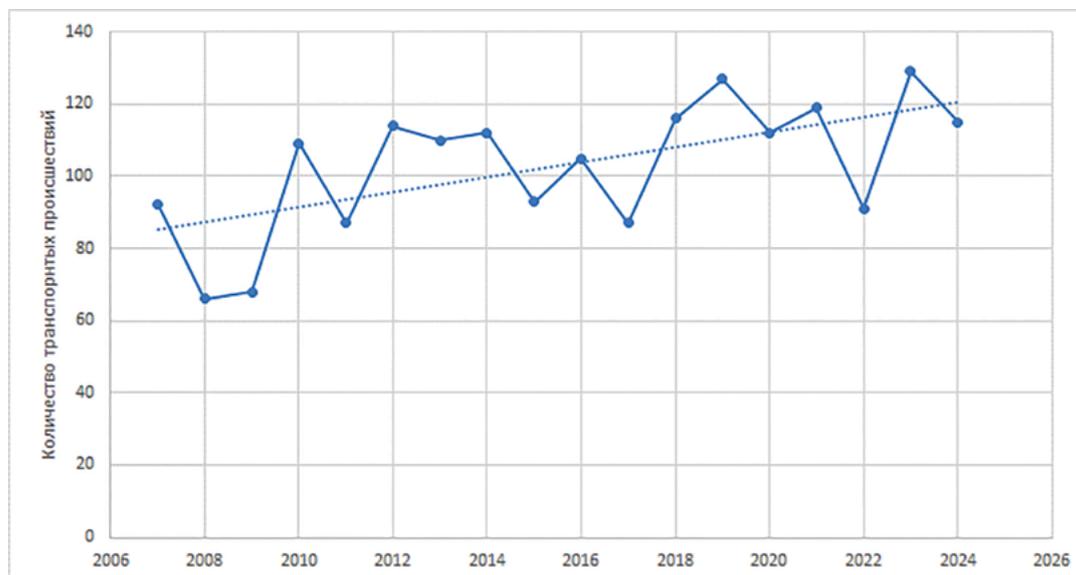


Рис. 1. Общее количество транспортных происшествий за год на внутренних водных путях России, график построен автором по данным [3]

навигационным оборудованием и проблемы с профессиональной подготовкой экипажей.

Статистический анализ показывает устойчивую динамику роста количества инцидентов (рис. 1). Если в 2015–2020 гг. среднегодовое число происшествий составляло 85–90 случаев, то к 2023 г. этот показатель увеличился до 129. При этом наиболее опасными с точки зрения последствий являются аварии танкеров и судов, перевозящих опасные грузы, частота которых возросла на 25% за последние пять лет.

Географическое распределение аварийности имеет четкую привязку к сложным участкам судоходства:

- перекатам и мелководным фарватерам (42% случаев);
- районам с интенсивным ледовым режимом (23%);
- подходам к портам и местам погрузки/разгрузки (18%).

Особую проблему представляют участвовавшие случаи столкновений с маломерными судами, доля которых в общей статистике увеличилась с 7 до 15% за последнее десятилетие. Это требует пересмотра системы регулирования движения на

внутренних водных путях и усиления контроля за соблюдением навигационных правил.

3. Характеристика и причины аварийных происшествий на внутренних водных путях

Анализ данных таблицы аварийности (табл. 1) на внутренних водных путях за период 2007–2024 гг. выявил волнообразную динамику количества происшествий, характеризующуюся следующими пиковыми значениями:

- 2010 г. — 109 случаев;
- 2012 г. — 114 случаев;
- 2014 г. — 112 случаев;
- 2019 г. — 127 случаев;
- 2023 г. — 129 случаев.

Эксплуатационные инциденты составляют основную долю (в среднем 90% от общего числа), тогда как аварии (катастрофы с тяжелыми последствиями) — лишь 3–7% ежегодно.

Анализ аварийности на внутренних водных путях позволяет выделить несколько основных типов происшествий, каждый из которых имеет специфические причины и последствия. Наиболее распространенным видом инцидентов явля-

Таблица 1. Анализ аварийности на внутреннем водном транспорте. Таблица составлена автором по данным [3]

| Наименование показателей | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Всего транспортных происшествий | 92 | 66 | 68 | 109 | 87 | 114 | 110 | 112 | 93 | 105 | 87 | 116 | 127 | 112 | 119 | 91 | 129 | 115 |
| в том числе | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| аварий | 6 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 5 | 4 | 7 | 6 | 5 | 1 | 7 | 1 | 0 | 3 | 4 | 6 |
| эксплуатационных происшествий | 84 | 65 | 65 | 107 | 85 | 110 | 105 | 108 | 86 | 99 | 82 | 115 | 120 | 111 | 119 | 88 | 125 | 109 |
| По видам: | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Столкновения | 8 | 3 | 9 | 14 | 5 | 16 | 14 | 7 | 11 | 9 | 7 | 11 | 8 | 4 | 13 | 12 | 15 | 20 |
| 2. Удар | 31 | 15 | 11 | 36 | 25 | 53 | 24 | 50 | 37 | 46 | 33 | 48 | 46 | 40 | 55 | 35 | 41 | 49 |
| 3. Затопление судов | 4 | 6 | 5 | 3 | 8 | 8 | 6 | 7 | 9 | 2 | 7 | 3 | 10 | 4 | 3 | 5 | 3 | 7 |
| 4. Посадка на мель | 34 | 31 | 38 | 42 | 41 | 37 | 48 | 40 | 23 | 34 | 29 | 37 | 40 | 43 | 28 | 23 | 31 | 27 |
| 5. Повреждение гидротехнических сооружений | 8 | 7 | 1 | 14 | 8 | 0 | 16 | 8 | 12 | 9 | 8 | 11 | 23 | 20 | 19 | 7 | 20 | 12 |
| 6. Прочие | 0 | 3 | 4 | – | – | – | 2 | – | 1 | 5 | 3 | 6 | – | 1 | 1 | 9 | 19 | – |

ются посадки на мель, составляющие около 35% от общего числа зарегистрированных случаев. Данный тип аварийности обусловлен комплексом факторов, включая сложные гидрологические условия, сезонные колебания уровней воды и недостаточное содержание судовых ходов. Характерным примером может служить инцидент, произошедший в июне 2023 г., когда грузовая мазутом баржа «Бельская-74» села на мель на Нижнекамшинском перекате реки Белая. Данное происшествие привело к 107-часовому простоя судна и создало реальную угрозу экологической катастрофы.

Вторым по частоте типом происшествий (25% случаев) являются столкновения, которые подразделяются на несколько категорий: столкновения между крупнотоннажными судами (15%); навалы на маломерные суда (55%); столкновения с гидротехническими сооружениями (30%).

Особую опасность представляют инциденты с участием маломерных судов, как это произошло в июне 2023 г. на Волге, когда теплоход «ОТА-954» в сцепке с баржами столкнулся с надувной лодкой, что привело к гибели одного человека.

Анализ подобных случаев свидетельствует о том, что основными причинами являются несоблюдение правил расхождения судов и недостаточный контроль за движением маломерного флота в зонах интенсивного судоходства.

Затопления судов, составляющие около 15% от общего числа происшествий, чаще всего связаны с техническими неисправностями корпусных конструкций (40% случаев); нарушением правил эксплуатации (35%); последствиями других аварийных ситуаций (25%).

Яркой иллюстрацией может служить инцидент 2022 г. на реке Ока, когда после столкновения с маломерным судном затонул грузовой теплоход. Особую категорию составляют аварии с разливами нефтепродуктов, которые, несмотря на относительно небольшую долю в общей статистике (5%), представляют наибольшую экологическую опасность. Подобные инциденты требуют особого внимания при разработке превентивных мер и систем оперативного реагирования.

Многофакторный анализ причин аварийности на внутренних водных путях выявляет комплекс

взаимосвязанных причинно-следственных связей. Доминирующим фактором (в 42 % случаев) выступают судоводительские ошибки, включающие:

- навигационные просчеты при прохождении сложных участков;
- недооценку гидродинамических эффектов при расхождении судов;
- игнорирование данных о течениях и ветровом дрейфе;
- неправильную интерпретацию показаний навигационных приборов.

Особенно критичными эти ошибки становятся в условиях арктического судоходства, где к традиционным сложностям добавляются экстремальные гидрометеорологические условия и ограниченная видимость.

Существенный вклад в аварийность (28 % случаев) вносят нарушения правил эксплуатации судов, среди которых наиболее опасными являются несоблюдение регламентов бункеровки (открытая заправка, использование некондиционного топлива); превышение допустимой осадки и перегруз судов; несвоевременное техническое обслуживание рулевых и двигательных систем; нарушение правил загрузки и крепления грузов.

Яркой иллюстрацией служит трагический инцидент, произошедший в мае 2023 г. на реке Обь, где в результате грубого нарушения правил бункеровки произошло возгорание судна, повлекшее за собой гибель капитана. Не менее значимым фактором (20 % случаев) остается неудовлетворительное состояние инфраструктуры: устаревшая система навигационного обслуживания; несвоевременное проведение дноуглубительных работ; недостаточное количество убежищ и мест аварийной стоянки; износ гидротехнических сооружений.

Особую категорию рисков (10 % случаев, но с наиболее тяжелыми последствиями) составляют экстремальные погодные условия, такие как ранние и поздние ледовые явления, штормовые

ветра, вызывающие сильное волнение, внезапные паводки и колебания уровней воды, ограниченная видимость из-за туманов и осадков.

В настоящее время наблюдаются климатические изменения, которые приводят к увеличению частоты и интенсивности опасных гидрометеорологических явлений. Следует отметить, что в большинстве случаев аварии происходят при сочетании нескольких неблагоприятных факторов, что требует комплексного подхода к разработке профилактических мер.

4. Многоплановые последствия аварийности на внутренних водных путях

Аварии на внутренних водных путях влекут за собой комплекс негативных последствий, имеющих выраженную социально-экономическую и экологическую составляющую. Антропогенные потери, согласно официальной статистике за 2022–2024 гг., составили 6 погибших, при этом анализ показывает устойчивую тенденцию к росту травматизма среди членов экипажей (на 15 % по сравнению с предыдущим пятилетним периодом). Хотя общее число летальных случаев снижается, сохраняется опасность отдельных инцидентов с человеческими жертвами, особенно при столкновениях с маломерными судами.

Наиболее значимым с точки зрения долгосрочного воздействия является экологический ущерб, особенно при разливах нефтепродуктов. Как уже упоминалось, в июне 2023 г. на реке Лена в водную экосистему попало 82 тонны бензина, что демонстрирует типичные последствия таких аварий: загрязнение акватории на площади 12,5 км²; гибель гидробионтов в прибрежной зоне; долгосрочное изменение биохимического состава донных отложений; необходимость проведения многолетнего экологического мониторинга.

Следует отметить, что в арктических условиях процессы естественной регенерации экосистем протекают значительно медленнее (в 3–5 раз по

сравнению с умеренными широтами), что многократно увеличивает экологический ущерб.

Экономические последствия аварийности проявляются в нескольких аспектах:

1. Прямые потери, которые включают простой судов (в среднем 72 часа на инцидент), затраты на аварийно-спасательные работы, утилизацию поврежденных судов.

2. Косвенные убытки, содержащие прерывание транспортных логистических цепочек, снижение инвестиционной привлекательности регионов и рост страховых тарифов на перевозки.

3. Долгосрочные последствия, включающие необходимость модернизации инфраструктуры, увеличение затрат на экологическую реабилитацию, потерю репутационного капитала судоходными компаниями.

Средняя стоимость ликвидации последствий одного серьезного инцидента в арктических условиях составляет 15–20 млн рублей, при этом экологические аварии требуют в 3–4 раза больших затрат. Эти данные подчеркивают экономическую целесообразность инвестиций в превентивные меры и системы раннего предупреждения аварийных ситуаций.

5. Основные тенденции, выявленные при анализе динамики аварийности на внутренних водных путях

Наблюдаемая в последние годы динамика аварийности на внутренних водных путях Арктического региона демонстрирует ряд значимых тенденций, требующих научного осмысления и адекватного управленческого реагирования. Наиболее выраженной является устойчивый рост общего количества инцидентов: по итогам 2023 г. зарегистрировано 129 происшествий, что на 41,7% превышает показатель предыдущего года (91 случай). Такой значительный прирост объясняется комплексом взаимосвязанных факторов, включая:

- увеличение интенсивности судоходства (на 18%, по данным Росморречфлота);
- прогрессирующий износ инфраструктуры (средний возраст гидротехнических сооружений превышает 35 лет);
- недостаточные темпы модернизации навигационного оборудования;
- климатические изменения, приводящие к увеличению числа экстремальных гидрометеорологических явлений.

Парадоксальным образом на фоне общего роста количества инцидентов отмечается снижение числа аварий с летальным исходом. В 2023 г. зафиксировано 2 случая гибели людей против 3 в 2022 г., что продолжает устойчивую тенденцию последнего пятилетия (среднегодовое снижение на 5,3%). Данная динамика может быть объяснена внедрением современных систем безопасности на судах, улучшением организации аварийно-спасательных служб, ужесточением контроля за соблюдением правил судоходства и повышением профессиональной подготовки экипажей.

Однако следует отметить, что данная положительная тенденция не распространяется на случаи травматизма, количество которых остается стабильно высоким (в среднем 7–9 случаев в год).

Беспокойство вызывает резкий рост количества повреждений гидротехнических сооружений (ГТС) — с 7 случаев в 2022 г. до 20 в 2023-м (увеличение на 185%). Столь значительный скачок обусловлен критическим уровнем износа основных фондов (по экспертным оценкам, до 60% ГТС требуют капитального ремонта), увеличением интенсивности эксплуатации, применением судов, не соответствующих габаритам сооружений и недостаточным финансированием текущего содержания.

Анализ показывает, что 65% повреждений ГТС происходят на шлюзах и причальных сооружениях, построенных еще в советский период и не проходивших капитальной реконструкции. Это создает серьезные риски для устойчиво-



Рис. 2. Рекомендации по снижению аварийности на внутренних водных путях. Схема составлена автором

сти всей транспортной системы арктического судоходства и требует безотлагательных мер по модернизации инфраструктуры.

6. Рекомендации по снижению аварийности на внутренних водных путях Арктики

Рекомендации по снижению к аварийности на внутренних водных путях можно свести к следующей схеме (рис. 2). Для составления рекомендаций использованы материалы публикаций [1–18].

Совершенствование навигационного обеспечения арктического судоходства

Современные требования к безопасности судоходства в Арктическом регионе диктуют необходимость кардинального пересмотра подходов к организации навигационного оборудования. Ключевым направлением модернизации должно стать создание адаптивной системы навигационных знаков нового поколения, оснащенных автоматическими системами позиционирования с коррекцией по данным ГЛОНАСС,

датчиками контроля ледовой обстановки, гидрологическими сенсорами для мониторинга уровня воды и системами дистанционного управления положением буев.

Также важное значение приобретает внедрение интегрированных систем электронной навигации (ECDIS), специально адаптированных для арктических условий. Эти системы должны включать: динамические цифровые карты с автоматическим обновлением сезонных изменений фарватеров, актуальные данные о глубинах и миграции перекатов и мелей; модуль прогнозирования ледовой обстановки; систему автоматического оповещения о навигационных опасностях; интерфейс интеграции с метеорологическими сервисами.

Перспективным направлением является внедрение комбинированных систем навигации, сочетающих спутниковый мониторинг, береговые радиолокационные станции, подводные акустические маяки, беспилотные мониторинговые платформы.

Реализация этих мер позволит повысить безопасность судоходства в условиях нарастающей транспортной нагрузки и климатических изменений в Арктическом регионе.

Совершенствование системы мониторинга и прогнозирования гидроледотермических условий

В современных условиях требуется создание комплексной системы мониторинга гидрологических и ледовых условий, основанной на принципах мультисенсорного подхода. Перспективным направлением является разработка распределенной сети автоматизированных гидрологических постов, интегрирующих датчики уровня воды с точностью ± 1 см, расходомеры нового поколения, автоматизированные ледемерные станции и подледные акустические профилографы.

Данные с наземных датчиков должны дополняться спутниковой информацией с космических аппаратов серий «Арктика-М» и «Канопус-В»,

обеспечивающей ежедневный мониторинг ледового покрова, оперативное выявление заторов льда, контроль динамики паводковых процессов, выявление опасных гидрологических явлений.

Современные технологии ледовой разведки должны включать многоуровневую систему наблюдений: спутниковый мониторинг с разрешением до 1 м, авиационную разведку с использованием специализированных самолетов-лабораторий и беспилотных летательных аппаратов дальнего радиуса действия, надводные и подледные автономные дроны, а также стационарные подледные датчики.

Перспективным направлением является разработка специализированных рекомендаций по судовождению в условиях климатических изменений, включающих алгоритмы прохождения зон раннего/позднего ледостава; методы оценки несущей способности льда; тактику маневрирования в условиях подвижных ледовых полей; стратегии преодоления заторов льда.

Реализация этих мер требует создания специализированных центров обработки данных, оснащенных суперкомпьютерными комплексами, системами искусственного интеллекта для анализа больших данных, верифицированными гидродинамическими моделями, системами визуализации гидрометеорологической информации.

Совершенствование системы профессиональной подготовки для арктического судоходства

Современные требования к безопасности судоходства в Арктическом регионе обуславливают необходимость кардинального пересмотра подходов к подготовке судовых экипажей. Ключевым направлением должно стать внедрение специализированных тренинговых программ, адаптированных к экстремальным условиям высоких широт. Такие программы должны включать комплексный курс по особенностям судовождения при отрица-

тельных температурах, охватывающий методы предотвращения обледенения корпуса и надстроек, специфику работы судовых механизмов в условиях низких температур, психофизиологические аспекты работы персонала в холодном климате и особенности эксплуатации спасательного оборудования при минусовых температурах.

Особое внимание в системе подготовки должно уделяться формированию навыков навигации в условиях ограниченной видимости, характерных для Арктического региона. Современные тренинговые комплексы должны включать:

1) полномасштабные симуляторы с реалистичным моделированием снежных зарядов и туманов, полярной ночи и белых ночей, ледовых полей различной концентрации;

2) виртуальные полигоны для отработки действий при внезапном изменении ледовой обстановки, появлении незапланированных препятствий, отказах навигационного оборудования;

3) практические занятия по использованию современных навигационных комплексов в экстремальных условиях.

Реализация такой комплексной системы подготовки позволит существенно повысить уровень безопасности судоходства в условиях нарастающих климатических изменений и увеличения транспортной нагрузки на арктические водные пути.

Совершенствование системы технического контроля судов арктического плавания

Современные требования к безопасности судоходства в условиях Арктики диктуют необходимость усиления контроля за техническим состоянием судов, осуществляющих плавание в высоких широтах. Особое внимание должно уделяться процедурам предрейсового осмотра, которые для судов, перевозящих опасные грузы, должны включать расширенный комплекс проверок, в том числе детальную диагностику корпусных конструкций с применением ультразвуковой

дефектоскопии, проверку систем герметичности грузовых танков и переборок, тестирование аварийных систем отключения и блокировки, контроль состояния изоляционных материалов и антикоррозионных покрытий.

В течение навигационного периода должен осуществляться обязательный мониторинг критически важных элементов судовых конструкций, особенно после прохождения ледовых участков. Для этого целесообразно внедрение:

1) автоматизированных систем контроля: толщины корпусных конструкций, напряжений в силовых элементах, состояния сварных швов;

2) регулярных водолазных осмотров подводной части корпуса;

3) комплексной диагностики главных и вспомогательных двигателей;

4) мониторинга состояния рулевых устройств и движительных комплексов.

Перспективным направлением повышения безопасности является внедрение интеллектуальных систем автоматического контроля, включающих распределенную сеть датчиков утечек в трюмах и отсеках, системы раннего предупреждения о поступлении забортной воды, автоматические газоанализаторы в грузовых и балластных танках, системы контроля параметров топлива и смазочных материалов, комплексы мониторинга вибрации и температурных режимов.

Реализация комплексной системы технического контроля позволит существенно снизить аварийность, обусловленную техническими отказами, и повысить уровень безопасности арктического судоходства в условиях экстремальных климатических воздействий.

Совершенствование инфраструктуры арктического судоходства: приоритетные направления

Модернизация гидротехнической инфраструктуры арктических водных путей требует ком-

плексного подхода, учитывающего экстремальные природно-климатические условия региона. Первоочередной задачей является оптимизация судоходных фарватеров на критически важных участках, включающая систематическое проведение дноуглубительных работ на перекатах с использованием современных земснарядов; расчистку русел в устьевых участках рек, подверженных интенсивному заилению; создание обходных каналов в зонах со сложным гидрологическим режимом; применение гидродинамических методов регулирования русловых процессов.

Для обеспечения оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации необходимо создание сети аварийно-спасательных пунктов, оснащенных специализированными плавсредствами ледового класса, комплектами оборудования для ликвидации разливов нефтепродуктов, мобильными насосными станциями, системами экстренной связи и навигации, запасами сорбентов и боновых заграждений.

Оптимальное размещение таких пунктов должно учитывать интенсивность судоходства, статистику аварийности, особенности гидрологического режима и доступность транспортных коммуникаций.

Усиление экологического мониторинга и аварийного реагирования

Для минимизации экологического ущерба от разливов нефтепродуктов необходимо совершенствовать систему мониторинга и механизмы оперативного реагирования. Ключевым направлением является разработка и регулярное обновление планов ЛАРН (ликвидация аварийных разливов нефтепродуктов) для всех судов и портов. Эти планы должны включать детальные протоколы действий в случае аварийных ситуаций, что позволит сократить время реагирования и снизить негативные последствия для морских экосистем.

Еще одним важным элементом является создание мобильных аварийных бригад, оснащенных специализированным оборудованием для локализации и ликвидации разливов топлива. Такие бригады должны быть готовы к немедленному разворачиванию в зоне ЧС, обеспечивая быстрое устранение загрязнений. Параллельно необходимо внедрять современные технологии мониторинга, включая использование беспилотных летательных аппаратов (дронов) и автоматизированных датчиков, позволяющих оперативно выявлять утечки нефтепродуктов и оценивать масштабы загрязнения водной среды.

Совершенствование нормативной базы и межведомственного взаимодействия

Для обеспечения безопасности судоходства в Арктическом регионе необходимо разработать специализированные региональные стандарты, учитывающие его уникальные природные условия. К ним относятся повышенные ледовые нагрузки, короткий навигационный период и сложные гидрометеорологические условия. Адаптация нормативных требований к этим факторам позволит минимизировать аварийные риски и повысить эффективность морских перевозок.

Важным аспектом является усиление координации между ключевыми ведомствами, включая Росморречфлот, МЧС, Росгидромет и представителей судоходных компаний. Создание единой системы оперативного обмена данными о ледовой обстановке, опасных участках и прогнозируемых погодных изменениях позволит своевременно корректировать маршруты судов и предотвращать аварийные ситуации.

Дополнительной мерой может стать стимулирование судовладельцев к использованию ледокольного сопровождения в наиболее рискованные периоды навигации — ранний и поздний сезоны. Это может включать субсидирование услуг ледоколов или предоставление налоговых льгот, что

повысит экономическую привлекательность безопасного судоходства и снизит нагрузку на экосистемы Арктики.

Заключение

Снижение аварийности судов в условиях Арктики требует реализации многофакторной стратегии, объединяющей технические, организационные и природоохранные аспекты. Ключевым элементом является модернизация судового состава, включая оснащение судов усиленными корпусами, современными навигационными системами и дублирующими энергетическими установками, адаптированными к экстремальным ледовым условиям. Параллельно необходимо развивать береговую инфраструктуру — строить аварийно-спасательные станции, ремонтные доки и пункты заправки, расположенные с учетом логистики арктического судоходства.

Особую значимость приобретает совершенствование системы мониторинга гидрологических и ледовых условий. Внедрение спутникового наблюдения в сочетании с сетью автономных буев и подводных датчиков позволит получать актуальные данные о толщине льда, течениях и других параметрах, критически важных для безопасной навигации. Эти сведения должны интегрироваться в единую информационную платформу для обеспечения оперативного принятия решений.

Не менее важным направлением является профессиональная подготовка экипажей, включающая:

- специализированную подготовку по ледовому плаванию;
- регулярные тренинги по действиям в аварийных ситуациях;
- отработку взаимодействия с ледоколами и спасательными службами.

Принципиальное значение имеет развитие системы прогнозирования и управления рисками. Создание математических моделей, учитываю-

щих ледовую динамику, метеоусловия и антропогенные факторы, позволит заблаговременно выявлять потенциально опасные ситуации. Для оперативного реагирования на ЧС необходимо сформировать мобильные аварийные бригады, оснащенные специализированным оборудованием для локализации разливов топлива и проведения спасательных операций в условиях низких температур.

Реализация указанных мер позволит снизить вероятность аварийных ситуаций, минимизировать их экологические последствия и обеспечить устойчивое развитие арктического судоходства. Эффективность предлагаемого подхода подтверждается мировым опытом эксплуатации судов в полярных водах, где аналогичные комплексные решения уже доказали свою результативность.

Список источников

1. Мунарев А. Н. Внутренние угрозы транспортной безопасности российского судоходства в современных условиях на внутренних водных путях / А. Н. Мунарев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2023. — № 4. — С. 124–127. — EDN WNMZOC.
2. Веселов Г. В. Проблемы эффективности и безопасности судоходства на внутренних водных путях / Г. В. Веселов, С. Е. Ионов, В. И. Минеев и др. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2013. — № 1. — С. 155–158.
3. Обзор аварийности с судами на море и внутренних водных путях Российской Федерации. 2008–2024. — URL: <https://rostransnadzor.gov.ru/rostransnadzor/podrazdeleniya/sea/deyatelnost-podrazdeleniya/81>.
4. Каретников В. В. Повышение навигационной безопасности плавания по затруднительным для судоходства участкам внутренних водных путей при использовании 3D электронных навигационных карт / В. В. Каретников, К. И. Ефимов, А. А. Прохоренков // Вестник государственного университета морского и речного флота им.

адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 7–20. — DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-7-20.

5. Рубан А. Д. правовое обеспечение безопасности эксплуатации внутреннего водного транспорта в РФ / А. Д. Рубан // *Океанский менеджмент*. — 2025. — № 1(30). — С. 12–15.

6. Сафонова А. П. Актуальность внедрения геоинформационных систем управления судоходством и обеспечения безопасности на внутреннем водном транспорте в Республике Беларусь / А. П. Сафонова, А. П. Афанасьев // *Перспективы развития транспортного комплекса: материалы III Международной заочной научно-практической конференции, Минск, 03–05 октября 2017 года / Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника»*. — Минск: Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника», 2017. — С. 36–41. —

7. Онищенко И. С. Обзор развития требований по обеспечению безопасности эксплуатации судов внутреннего плавания / И. С. Онищенко // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 75–85. — DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85.

8. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков на внутреннем водном транспорте Российской Федерации / В. В. Каретников, К. И. Ефимов, А. А. Сикарев // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2017. — № 2. — С. 22–27. — DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-22-27.

9. Бурмистров Е. Г. Модельно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы поддержки принятия решений при угрозе потери поперечной остойчивости речного пассажирского судна / Е. Г. Бурмистров, А. В. Валяев, Е. А. Лукина, Ю. С. Федосенко // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2024. — № 4-2(66). — С. 70–78. — DOI: 10.37220/МТ.2024.66А.061.

10. Зайкова С. Н. Комплексность обеспечения безопасности на внутреннем водном транспорте / С. Н. Зайкова // *Административное и муниципальное право*. — 2023. — № 4. — С. 65–79. — DOI: 10.7256/2454-0595.2023.4.43672.

11. Рябухо Е. Н. Сравнительный анализ аварийности судов на морских путях Российской Федерации за I квартал 2022 и 2023 гг. / Е. Н. Рябухо, А. В. Шлома // *Образование и наука: современный вектор развития: материалы III Национальной научно-практической кон-*

ференции, Керчь, 20–21 мая 2024 года. — Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2024. — С. 70–75.

12. Лобанов В. А. Ледовые качества и ледовая аварийность флота внутреннего и смешанного плавания / В. А. Лобанов // *Интернет-журнал Науковедение*. — 2013. — № 4(17). — С. 69.

13. Шаронов А. Ю. Особенности гидрометеорологического обеспечения внутренних водных путей / А. Ю. Шаронов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2009. — № 4(58). — С. 39–45.

14. Зуев В. Ф. Основные аспекты повышения точности местоопределения судов на сложных участках внутренних водных путей / В. Ф. Зуев, О. В. Соляков // *Журнал университета водных коммуникаций*. — 2012. — № 3. — С. 160–164.

15. Титов А. В. Современное состояние и проблемы использования внутренних водных путей (на примере Волго-Каспийского морского судоходного канала): монография / А. В. Титов, С. Н. Зайкова, И. А. Волынский, А. А. Хмельницкая; под общей редакцией А. В. Титова. — Пенза: Социосфера, 2017. — 528 с. DOI: 10.24044/book.2017.1.

16. Уртминцев Ю. Н. Речные информационные системы как фактор повышения эффективности работы внутреннего водного транспорта / Ю. Н. Уртминцев // *Научные проблемы водного транспорта*. — 2024. — № 80. — С. 249–257. — DOI: 10.37890/jwt.vi80.524.

17. Плющаев В. И. Цифровая система диспетчерского регулирования движения судов на внутренних водных путях / В. И. Плющаев // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2024. — Т. 20. — № 4. — С. 26–32. — DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.4.004.

18. Биргер А. Я. Некоторые проблемные вопросы диспетчерского регулирования движения судов на внутренних водных путях Российской Федерации / А. Я. Биргер, В. В. Каретников, Ю. Г. Андреев // *Транспортное дело России*. — 2024. — № 4. — С. 258–263.

Дата поступления: 25.07.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

ВОЛКОВА Надежда Александровна — канд. физ-мат. наук; navolkova@aari.ru

An Integrated Approach to Reducing Accidents on Inland Waterways in the Arctic Region of Russia

N. A. Volkova^{1,2}

¹Russian State Hydro-Meteorological University, 79, Voronezhskaya str., Saint Petersburg, 193007, Russian Federation.

²Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Beringa str., Saint Petersburg, 199397, Russian Federation.

For citation: Volkova N. A. An Integrated Approach to Reducing Accidents on Inland Waterways in the Arctic Region of Russia // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 761–775. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-761-775

Summary

Purpose: To analyse accidents on inland waterways in Russia with a particular focus on the Arctic zone. To identify the key risk factors. To develop measures to improve navigation safety. **Methods:** The data for the period 2007–2024 was subjected to statistical analysis, while a hydrographic assessment of the waterways was also conducted. Furthermore, a multivariate analysis of accident causes was performed, and a comparison was made of the effectiveness of modern and traditional navigation methods. **Results:** The primary categories of accidents identified were groundings (35%), collisions (25%), and ship sinking (15%). The primary causes have been identified as follows: human error (42%), operational violations (28%), infrastructure wear and tear (20%), and extreme weather conditions (10%). **Practical significance:** Recommendations have been formulated for the modernisation of navigation systems through the utilisation of GLONASS/GPS technologies; the establishment of a network of emergency rescue stations; the introduction of specialised crew training programmes; and the augmentation of environmental monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs) and sensors. The implementation of the proposed measures is expected to result in a 30–40% reduction in accidents and a significant minimisation of environmental damage in the Arctic region.

Keywords: Inland waterways, Arctic, ship accident rate, navigation safety.

References

1. Munarev A. N. Vnutrennie ugrozy transportnoy bezopasnosti rossiyskogo sudokhodstva v sovremennykh usloviyakh na vnutrennikh vodnykh putyakh [Internal threats to transport security of Russian shipping in modern conditions on inland waterways]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East]. 2023, Iss. 4, pp. 124–127. (In Russian)
2. Veselov G. V., Ionov S. E., Mineev V. I. et al. Problemy effektivnosti i bezopasnosti sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh [Problems of efficiency and safety of shipping on inland waterways]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East]. 2013, Iss. 1, pp. 155–158. (In Russian)
3. *Obzor avariynosti s sudami na more i vnutrennikh vodnykh putyakh Rossiyskoy Federatsii. 2008–2024* [Overview of accidents involving vessels at sea and inland waterways of the Russian Federation. 2008–2024]. Available at: <https://rostransnadzor.gov.ru/rostransnadzor/podrazdeleniya/sea/deyatelnost-podrazdeleniya/81>. (In Russian)
4. Karetnikov V. V., Efimov K. I., Prokhorenkov A. A. Povyshenie navigatsionnoy bezopasnosti plavaniya po zatrudnitel'nym dlya sudokhodstva uchastkam vnutrennikh vodnykh putey pri ispol'zovanii 3D elektronnykh navigatsionnykh kart [Improving navigation safety of navigation in difficult sections of inland waterways using 3D electronic navigation charts]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* [Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet

named after Admiral S. O. Makarov]. 2025, vol. 17, Iss. 1, pp. 7–20. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-7-20. (In Russian)

5. Ruban A. D. Pravovoe obespechenie bezopasnosti ekspluatatsii vnutrennego vodnogo transporta v RF [Legal support for the safety of inland water transport operation in the Russian Federation]. *Okeanskiy menedzhment* [Ocean Management]. 2025, Iss. 1(30), pp. 12–15. (In Russian)

6. Safonova A. P., Afanas'ev A. P. Aktual'nost' vnedreniya geoinformatsionnykh sistem upravleniya sudokhodstvom i obespecheniya bezopasnosti na vnutrennem vodnom transporte v Respublike Belarus' [Relevance of implementing geo-information systems for managing shipping and ensuring safety in inland water transport in the Republic of Belarus]. *Perspektivy razvitiya transportnogo kompleksa: materialy III Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects for the development of the transport complex: materials of the III International Correspondence Scientific and Practical Conference]. Minsk: Belorusskiy nauchno-issledovatel'skiy institut transporta "Transtekhnika" Publ., 2017, pp. 36–41. (In Russian)

7. Onishchenko I. S. Obzor razvitiya trebovaniy po obespecheniyu bezopasnosti ekspluatatsii sudov vnutrennego plavaniya [Overview of the development of requirements for ensuring the safety of inland navigation vessels]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* [Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov]. 2025, vol. 17, Iss. 1, pp. 75–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85. (In Russian)

8. Karetnikov V. V., Efimov K. I., Sikarev A. A. K voprosu otsenki riskov na vnutrennem vodnom transporte Rossiyskoy Federatsii [On the issue of risk assessment in inland water transport of the Russian Federation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology]. 2017, Iss. 2, pp. 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-22-27. (In Russian)

9. Burmistrov E. G., Valyaev A. V., Lukina E. A., Fedosenko Yu. S. Model'no-algoritmicheskoe obespechenie

avtomatizirovannoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy pri ugroze poteri poperechnoy ostoychivosti rechnogo passazhirskogo sudna [Model-algorithmic support of an automated decision support system in case of threat of loss of transverse stability of a river passenger vessel]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intellectual Technologies]. 2024, Iss. 4-2(66), pp. 70–78. DOI: 10.37220/MIT.2024A.66A.061. (In Russian)

10. Zaykova S. N. Kompleksnost' obespecheniya bezopasnosti na vnutrennem vodnom transporte [Complexity of safety provision in inland water transport]. *Administrativnoe i munitsipal'noe pravo* [Administrative and Municipal Law]. 2023, Iss. 4, pp. 65–79. DOI: 10.7256/2454-0595.2023.4.43672. (In Russian)

11. Ryabukho E. N., Shloma A. V. Sravnitel'nyy analiz avariynosti sudov na morskikh putyakh Rossiyskoy Federatsii za I kvartal 2022 i 2023 gg. [Comparative analysis of vessel accidents on sea routes of the Russian Federation for the 1st quarter of 2022 and 2023]. *Obrazovanie i nauka: sovremennyy vektor razvitiya: materialy III Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Kerch', 20–21 maya 2024 goda* [Education and Science: Modern Development Vector: Materials of the III National Scientific and Practical Conference, Kerch, May 20–21, 2024]. Kerch: FGBOU VO "Kerchenskiy gosudarstvennyy morskoy tekhnologicheskii universitet" Publ., 2024, pp. 70–75. (In Russian)

12. Lobanov V. A. Ledovye kachestva i ledovaya avariynost' flota vnutrennego i smeshannogo plavaniya [Ice qualities and ice accident rate of inland and mixed navigation fleet]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Internet Journal Naukovedenie]. 2013, Iss. 4(17), p. 69. (In Russian)

13. Sharonov A. Yu. Osobennosti gidrometeorologicheskogo obespecheniya vnutrennikh vodnykh putey [Features of hydrometeorological support of inland waterways]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta* [Exploitation of maritime transport]. 2009, Iss. 4(58), pp. 39–45. (In Russian)

14. Zuev V. F., Solyakov O. V. Osnovnye aspekty povysheniya tochnosti mestoopredeleniya sudov na slozhnykh uchastkakh vnutrennikh vodnykh putey [Main aspects of improving the accuracy of vessel positioning in difficult sections of inland waterways]. *Zhurnal universiteta vodnykh*

kommunikatsiy [Journal of University of Water Communications]. 2012, Iss. 3, pp. 160–164. (In Russian)

15. Titov A. V., Zaykova S. N., Volynskiy I. A., Khmel'nitskaya A. A. *Sovremennoe sostoyanie i problemy ispol'zovaniya vnutrennikh vodnykh putey (na primere Volgo-Kaspiyskogo morskogo sudokhodnogo kanala): monografiya* [Modern state and problems of using inland waterways (on the example of the Volga-Caspian Sea Shipping Canal): monograph]. Penza: Sotsiosfera Publ., 2017, 528 p. DOI: 10.24044/book.2017.1. (In Russian)

16. Urtmintsev Yu. N. *Rechnye informatsionnye sistemy kak faktor povysheniya effektivnosti raboty vnutrennego vodnogo transporta* [River information systems as a factor in increasing the efficiency of inland water transport operation]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta* [Scientific problems of water transport]. 2024, Iss. 80, pp. 249–257. DOI: 10.37890/jwt.vi80.524. (In Russian)

17. Plyushchaev V. I. *Tsifrovaya sistema dispetcherskogo regulirovaniya dvizheniya sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh* [Digital system of vessel traffic dispatching control

on inland waterways]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2024, vol. 20, Iss. 4, pp. 26–32. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.4.004. (In Russian)

18. Birger A. Ya., Karetnikov V. V., Andreev Yu. G. *Nekotorye problemnye voprosy dispetcherskogo regulirovaniya dvizheniya sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh Rossiyskoy Federatsii* [Some problematic issues of vessel traffic dispatching control on inland waterways of the Russian Federation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport Business of Russia]. 2024, Iss. 4, pp. 258–263. (In Russian)

Received: July 25, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Nadezhda A. VOLKOVA — PhD in Physics and Mathematics; navolkova@aari.ru

УДК 004.94+725

Опыт разработки цифровой информационной модели промышленных зданий

А. А. Шарафутдинова¹, М. Я. Брынь², Е. Г. Третьякова², Ж. В. Иванова²

¹ООО «Триметари Консалтинг», Российская Федерация, 195197, Санкт-Петербург, Маршала Блюхера пр., 12, корп. 7

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

Для цитирования: Шарафутдинова А. А., Брынь М. Я., Третьякова Е. Г., Иванова Ж. В. Опыт разработки цифровой информационной модели промышленных зданий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 776–789. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-776-789

Аннотация

Цель: Показать необходимость внедрения цифровой информационной модели на всем протяжении жизненного цикла промышленных зданий. **Методы:** В настоящее время использование BIM-технологий становится обязательной составляющей на всех этапах жизненного цикла зданий различного назначения — от момента проектирования, строительства и до полного их сноса. Показать многообразие области практического применения цифровых информационных моделей. Выявить особенности подхода к вопросам, связанным с проектированием, реконструкцией, вариантами подхода к редевелопменту промышленных зданий. Выполнить анализ документов, регулирующих требования к цифровой информационной модели (ЦИМ). Рассмотреть процесс создания цифровой модели с приведением одного из вариантов реализации проекта по разработке ЦИМ для промышленного объекта. **Результаты:** Разработана методика формирования эксплуатационной ЦИМ на основе наземного лазерного сканирования, элементами которой являются архитектурные и конструктивные решения, сопутствующая техническая документация и другие материалы. **Практическая значимость:** На конкретном примере показана необходимость и целесообразность внедрения ЦИМ в проектирование, строительство и реконструкцию промышленных объектов.

Ключевые слова: Цифровая информационная модель, промышленный объект, редевелопмент, наземное лазерное сканирование, программное обеспечение Revit.

Среди объектов капитального строительства промышленные здания занимают особое место, сочетая в себе конструктивные и технологические особенности. На протяжении по меньшей мере двухсот лет сложилась типология этих объектов, появились ансамбли производственных зданий, многие из которых сегодня являются объектами культурного наследия и входят в списки памятников истории и культуры не только регионального, но и федерального значения. Являясь доминантами исторических городов, подчас зани-

мая ведущее положение в городских районах, они не должны деградировать. Однако многие из них сегодня пребывают в катастрофическом положении, нуждаясь в реконструкции и реставрации путем интеграции и социальной адаптации.

Промышленное наследие многообразно. К нему относятся: фабричные, складские здания, электростанции, мельницы, мосты и др. В последние десятилетия сложился новый прием работы с этими объектами, получивший название «редевелопмент». Он позволяет сохранять исто-

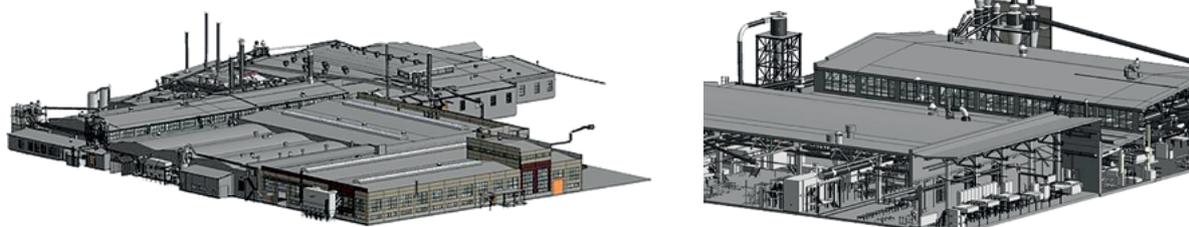


Рис. 1. Трехмерная редактируемая модель производственного корпуса фанерного комбината [6]



Рис. 2. Построенная BIM-модель бывшего вагоностроительного завода им. И. Е. Егорова [7]

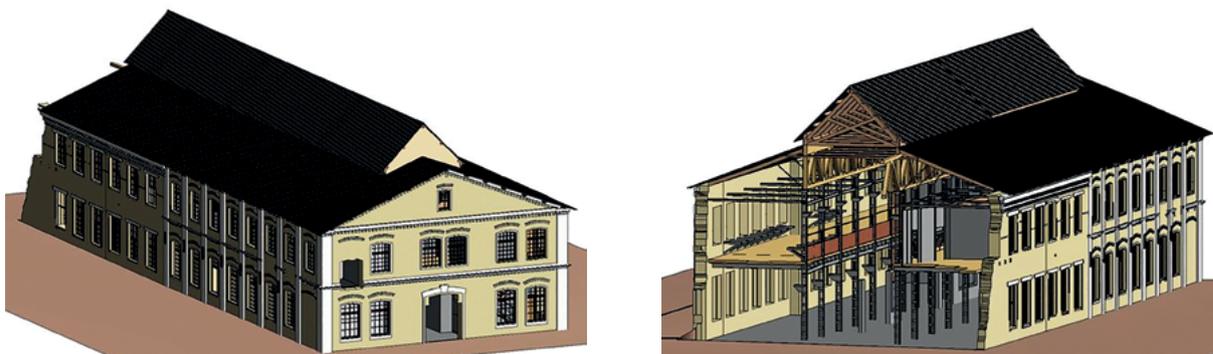


Рис. 3. Созданная на основе трехмерного лазерного сканирования 3D-модель здания токарно-механической мастерской [7]

рически значимые сооружения в рабочем состоянии и интегрировать их в социокультурную жизнь города.

Проекты по перепрофилированию промышленного наследия к современным реалиям имеют определенные особенности и отличаются от других строительных проектов. В последние годы были проведены многочисленные исследования по моделированию информации об исторических промышленных зданиях — памятниках истории и культуры [1–5]. При этом показано, что некоторые соответствующие стандарты обеспечивают основу, которая может применяться в жизненном цикле здания промышленного наследия: от стратегического планирования до предварительного проектирования, строительства, разработки,

документирования и процесса редулопмента (рис. 1–4).

Все это позволяет констатировать, что для более безопасной реставрации промышленных зданий цифровизация с использованием информационного моделирования зданий (BIM) в настоящее время весьма актуальна.

Сегодня цифровая модель — это не просто наглядная визуализация здания с богатым набором различных данных из множества источников на всех этапах ее жизненного цикла, которая может совместно использоваться всеми заинтересованными сторонами. Это ее цифровой двойник, хранящий атрибутивную информацию о соответствующих элементах здания и его компонентах, которые должны использоваться

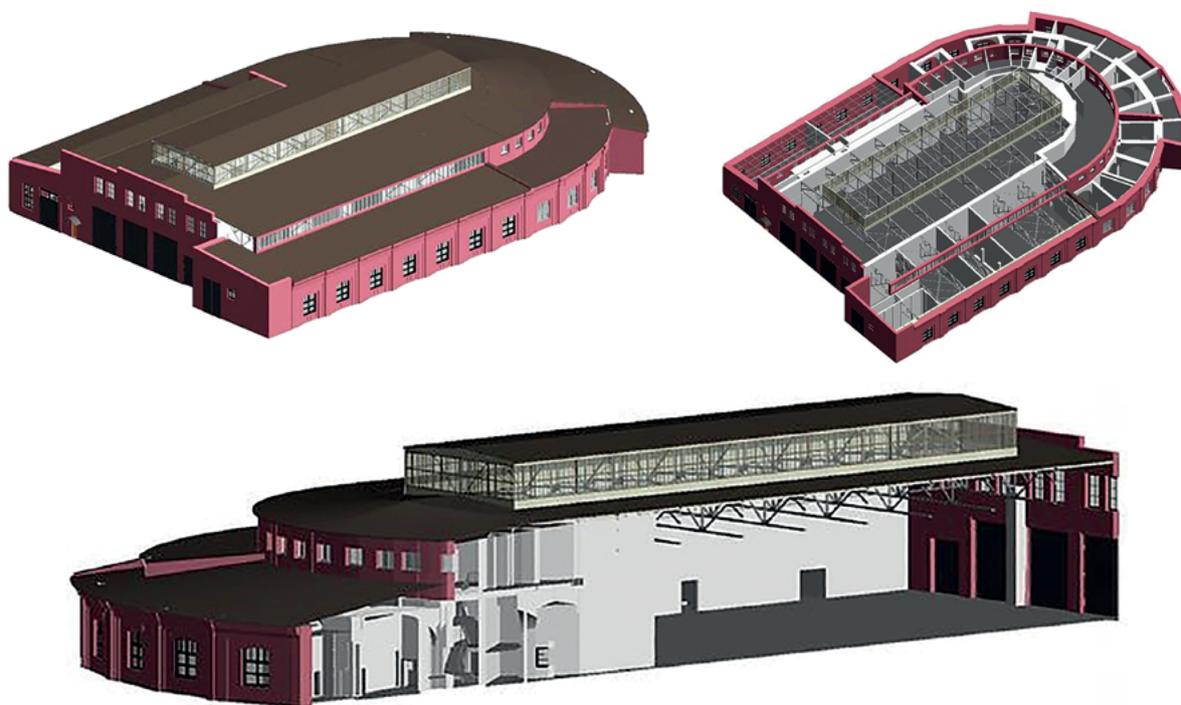


Рис. 4. Созданная трехмерная редактируемая BIM-модель здание депо Балтийского вокзала в системе AutodeskRevit [7]

и храниться в течение всего срока службы здания — от момента постройки до процесса переработки. Так, любая информация, связанная, например, с охраной труда и техникой безопасности (старые элементы, содержащие асбест, в промышленном здании; стальная конструкция с риском падения; поручни на высоте, использовавшиеся ранее, но не соответствующие современным требованиям), может быть перенесена в модель.

Невзирая на преимущества BIM технологии для использования в зданиях промышленного наследия, в последнее время большое внимание уделяется также конструктивной надежности и безопасности вновь возводимых промышленных зданий и сооружений, скорости и качеству их проектирования и строительства.

Повышению этих показателей способствует расширение использования технологии информационного моделирования за счет интеграции новых методов расчета в цифровую модель здания.

Проблемы инновационного развития строительной отрасли требуют комплексного внедрения цифровых технологий в решение различных задач в сфере производства стройматериалов, проектирования и непосредственно строительного производства.

Building Information Modeling (BIM) — это не столько инструмент проектирования, сколько средство создания и управления информацией. Сама модель представляет собой 3D-визуализацию с базой данных, цифровое описание каждого элемента построенного объекта, которое можно расширять, детализировать и усложнять.

Помимо данных о физических свойствах каждого компонента, они могут также включать информацию о строительных программах и стоимости, потребностях в обслуживании и потреблении энергии.

Добавление временного элемента в трехмерную модель превращает ее в модель 4D-BIM, что



Рис. 5. Треугольная конструкция крыши кампуса Nvidia в Санта-Кларе. Смоделирована с помощью графического процессора, имитирующего реакцию материалов на изменения дневного света (<https://www.hardwareluxx.ru/index.php/news/allgemein/technology/41834-gtc17-nvidia.html>, дата обращения: 30.04.2025)

позволяет увидеть, как будет выглядеть конструкция с течением времени.

Достижения в области 3D-моделирования уже оказали глубокое влияние на форму зданий как гражданского назначения, так и промышленного, и теперь они начинают менять пользовательский опыт. Автоматизированное параметрическое проектирование — это создание цифровой модели в соответствии с серией заранее запрограммированных правил, которые автоматически генерируют определенные элементы, поэтому оно основано на внутренней логике, а не на человеческих манипуляциях. В основном параметрические правила создают отношения между различными элементами, гарантирующими, например, что стена начинается на уровне пола и достигает нижней поверхности перекрытия. Затем, если высота от пола до потолка изменяется, стена автоматически подстраивается под нее. Параметрическое проектирование также позволяет проектировать очень сложные геометрии и структуры (рис. 5), которые такие архитекторы, как Zaha Hadid, Frank Gehry и Daniel Libeskind, использовали для создания отличительных экспрессионистских форм. Эти параметры постоянно расширяются,

охватывая не только форму и структуру здания, но и менее осязаемые факторы, такие как освещение, акустика, энергоэффективность и технологические процессы.

Модели BIM в перспективе станут более интеллектуальными за счет внедрения в процесс проектирования большего количества данных, извлекаемых из подключенных к интернету датчиков. Это даст проектировщикам беспрепятственно получать доступ к показателям, связанным с использованием здания, производительностью и поведением пользователей, в то же время архивные данные по проектам, включая 3D-модели, 2D-чертежи, изображения и текст, могут быть изучены, и эти идеи могут быть перенесены в новые проекты.

С другой стороны, полученные модели зданий можно будет связать вместе, чтобы обеспечить еще более сложное моделирование застроенной среды, в том числе и промышленной. Тем самым проектировщики получают возможность в режиме реального времени видеть картину полностью запроектированного города. По мере того, как эти модели становятся шире по охвату, они становятся все более мощными инструментами, устраняя необходимость дублировать информацию обследований и обеспечивая более полное пони-

мание того, как взаимодействуют здания различного назначения.

Так, например, такие города как Лондон, Гамбург, Сингапур и Хельсинки, уже имеют в своем арсенале разработанные интеллектуальные 3D-модели городской среды, которые упрощают процесс планирования и проектирования различных объектов и инфраструктур. Эти модели можно расширять в реальном времени, добавляя поток данных по любым вопросам: от движения транспорта до эффективности зданий и качества воздуха. Таким образом, это позволит городским властям иметь возможность контролировать и настраивать системы, а застройщикам и архитекторам — проверять влияние образующихся схем на окружающую среду.

Развитие в данном направлении промышленных объектов с внедрением BIM-технологий выводит на новый уровень процесс их проектирования [8–11].

В этом контексте цифровая информационная модель (ЦИМ), а именно такой термин используется в России вместо термина BIM, становится неотъемлемым инструментом в жизненном цикле рассматриваемых объектов, способствующим более качественной и продуктивной их реализации.

В зависимости от стадии жизненного цикла промышленного объекта выделяют следующие виды ЦИМ:

– *Проектная ЦИМ* — информационная модель, создаваемая на этапе проектирования. Объединяет всю проектную документацию в едином пространстве, помогает выявлять междисциплинарные коллизии и формировать чертежи и спецификации для строительства.

– *Исполнительная ЦИМ* — информационная модель, создаваемая после строительства или реконструкции на основе исполнительной документации и лазерного сканирования. Обеспечивает актуальные данные об объекте в реальном времени для его дальнейшей эксплуатации.

– *Эксплуатационная ЦИМ* — информационная модель, разрабатываемая на основе всей проектной, конструкторской, строительной, технологической, экономической и иной информации об объекте со всеми ее взаимосвязями, а также зависимостями одного элемента от другого. Эксплуатационная ЦИМ предполагает, что объекты и все, что имеет к ним отношение, рассматриваются как единый объект. Эксплуатационная ЦИМ — не просто 3D-модель объекта, а инструмент для работы с информацией. Позволяет извлекать, обновлять данные об элементах и обеспечивать взаимодействие между отделами.

Формирование и актуализация ЦИМ обычно выполняются поэтапно — от изысканий до эксплуатации объекта. Проектирование ведется в 3D, модель обновляется на каждой стадии. На практике встречаются такие случаи:

– Проектирование нового объекта выполняется в двумерном виде, затем по окончании строительства по результатам лазерного сканирования и выпущенной рабочей и исполнительной документации создается исполнительная ЦИМ.

– Во время эксплуатации техническая документация теряется или устаревает из-за локальных ремонтов. Проект реконструкции создают по данным лазерного сканирования — либо в облаке точек, либо на основе исполнительной ЦИМ. После реконструкции модель нужно обновить.

– Проектирование нового объекта выполняется в двумерном виде, выпускается рабочая документация для строительства, затем по завершении строительства выпускается исполнительная документация, на основе которой создается исполнительная ЦИМ.

Такие примеры имеют существенные недостатки, влекущие за собой удорожание проекта и получение результирующей ЦИМ, не соответствующей реальному объекту.

Еще одна проблема ЦИМ — участие разных подрядчиков с собственными методиками и ПО.

Российская нормативно-техническая документация

- СП 333.1325800.2020 Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла.
- СП 331.1325800.2017 Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах.
- СП 328.1325800.2017 Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования компонентов информационной модели.
- СП 404.1325800.2018 Информационное моделирование в строительстве. Правила разработки планов проектов, реализуемых с применением технологии информационного моделирования.
- СП 471.1325800.2019 Информационное моделирование в строительстве. Контроль качества производства строительных работ.
- ГОСТ Р 57310-2016 (ИСО 29481-1:2010) Моделирование информационное в строительстве. Руководство по доставке информации. Методология и формат.
- ГОСТ Р 57311-2016 Моделирование информационное в строительстве. Требования к эксплуатационной документации объектов завершеного строительства.
- ГОСТ Р 57563-2017/ISO/TS 12911:2012 «Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений (ISO/TS 12911:2012)».

Зарубежная нормативно-техническая документация**Великобритания**

- BS 8536-1 Указания для проектирования и строительства. Часть 1. Свод правил для эксплуатации зданий и сооружений.
- PAS 1192-2 Спецификация для управления информацией на стадии капитального строительства с использованием информационного моделирования.
- PAS 1192-3 Спецификация для управления информацией на стадии эксплуатации объекта с использованием информационного моделирования.
- SO 19650-1:2018 Организация и оцифровка информации о зданиях и объектах гражданского строительства, включая информационное моделирование зданий (BIM). Управление информацией с использованием информационного моделирования зданий.
- AEC (UK) BIM Technology Protocol v.2.1.1. Практика применения BIM в промышленном и гражданском строительстве Великобритании.

Соединенные Штаты Америки

- Национальный BIM-Стандарт США.
- AIA E203. Представление BIM и цифровых данных.
- Определение уровней проработки.
- USACE BIM. Матрица определения требований.

Канада

- Инструкция по разработке плана исполнения BIM-Проекта.
- AEC (CAN) BIM Protocol. Практика применения BIM в промышленном и гражданском строительстве Канады.

Норвегия: Statsbygg. Руководство по BIM.**Финляндия: SOBIM. Общие требования по BIM.****Новая Зеландия: New Zealand BIM Handbook. Руководство по BIM.****Рис. 6.** Нормативно-техническая документация, регламентирующая разработку ЦИМ

Это приводит к несовместимости результатов на этапах проектирования и строительства.

Несмотря на то, что в последние годы активно разрабатываются и улучшаются нормативные документы, регламентирующие требования к ЦИМ, на практике все еще существует разрозненность в понимании процесса разработки, состава ЦИМ и задач, которые возможно решить с ее применением.

Для эффективного внедрения ЦИМ нужно определить:

- задачи для решения с помощью модели;
- состав модели;
- процесс ее создания.

Основные требования к разработке ЦИМ в российской и мировой практике регламентируются документами, приведенными на рис. 6.

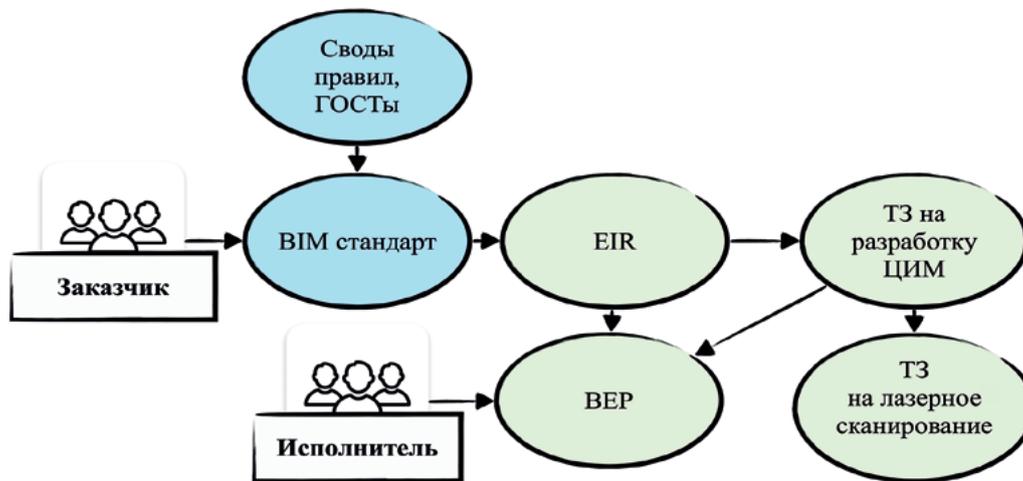


Рис. 7. Схема разработки требований к ЦИМ

На практике организации, внедряющие технологии ЦИМ, все чаще разрабатывают внутренний стандарт моделирования — ВИМ-стандарт. В нем представлены требования к процессу информационного моделирования объекта, не привязанные к конкретному проекту, а определяющие общую стратегию и регламентирующие работу участников процесса с учетом выбранного ПО. Этот документ помогает всем участникам проекта (заказчику, проектной организации, строителям, эксплуатирующим организациям) выстраивать диалог.

Учитывая уникальность каждого объекта, условия разработки ЦИМ меняются. Поэтому невозможно предъявлять единые требования для всех проектов. На практике используют подход на основе нормативно-технической документации или ВИМ-стандарта. Перед началом проектирования, строительства или ввода объекта в эксплуатацию создают детализирующие документы, которые регламентируют все этапы формирования ЦИМ (рис. 7).

Далее для полного понимания представленной на рис. 7 схемы раскроем ее элементы.

Информационные требования заказчика (Employer's information requirements, EIR) содержат детализированные технические требования к разработке ЦИМ и оформляются в виде

приложения к техническому заданию, конкретизируя и дополняя его. При этом устанавливается перечень дисциплин модели, требования к составу каждой из дисциплин и их координации (рис. 8), определяются требования к наименованию файлов и элементов модели. При разработке ЦИМ больших объектов в EIR определяются требования к разделению модели и координации файлов. Одним из важнейших разделов документа являются требования к уровню проработки модели LOD, уровню проработки информации LOI и уровню проработки точности LOA, представляющие собой таблицы категорий элементов, составляющих информационную модель, с указанием уровня проработки каждого элемента [12].

План выполнения проекта информационного моделирования (BIM Execution plan, ВЕР) служит основным протоколом совместной работы всех участников на протяжении жизненного цикла проекта. В документе утверждаются стратегии, рабочие процессы проекта, процессы создания моделей, участники проекта и совместное использование информации.

В техническом задании (ТЗ) на разработку ЦИМ устанавливаются основные цели выполнения работ и задачи, которые необходимо решить с применением результатов работ, а также детальный состав видов выполняемых работ. Здесь же



Рис. 8. Координация элементов ЦИМ

определяются требования к исполнителю работ, например требования к сотрудникам, требования к наличию опыта в определенном секторе и требования к взаимодействию заказчика и исполнителя. В техническом задании также определяются требования к программному обеспечению, в котором разрабатывается ЦИМ и требования к составу, виду и формату отчетной документации по результатам работ.

Техническое задание на выполнение лазерного сканирования определяет его границы, устанавливает систему координат, в которой должна быть выполнена съемка, определяет перечень полевых и камеральных работ, а также перечень передаваемых результатов. Важным пунктом данного документа является разработка методики лазерного сканирования и требования к точности и контролю результатов измерений. Здесь же закрепляются исходные материалы, включающие в себя координаты исходных пунктов, и определяются требования к программному обеспечению для обработки результатов измерений.

Приведем реализацию проекта по разработке ЦИМ на примере формирования эксплу-

атационной цифровой информационной модели промышленного объекта.

В качестве объектов рассмотрены два здания на территории промышленного предприятия: первое — трехэтажное офисное здание площадью 1400 м², построенное в 2020 г.; второе — промышленное здание с крупногабаритным оборудованием и трехэтажной пристройкой с офисами общей площадью 3600 м², введенное в эксплуатацию в 1980 г. Следует отметить, что оба объекта нуждались в актуализации технической документации. Так, анализируя исполнительную документацию по офисному зданию, было выявлено множество несоответствий с фактическим расположением конструкций и коммуникаций. Техническая документация по промышленному зданию практически полностью потеряла актуальность в связи с проведенными ремонтами за время эксплуатации. В связи с этим для дальнейшего управления объектами и разработки проектов реконструкции задача разработки ЦИМ являлась крайне актуальной.

Согласно техническому заданию требовалось выполнить:

1) наземное лазерное сканирование с панорамной фотосъемкой;

2) сбор технической документации об объектах;

3) разработку ЦИМ по результатам сканирования и документации с уточнением через службу эксплуатации;

4) выпуск актуальной техдокументации на основе ЦИМ: поэтажные планы, чертежи разрезов, схемы размещения оборудования, коммуникаций и принципиальные схемы по дисциплинам.

Результатами работ были определены: единая точечная модель; панорамный фототур, позволяющий выполнять измерения и вносить комментарии; эксплуатационная ЦИМ и комплекты технической документации по каждой из дисциплин.

Согласно EIR в ЦИМ должно быть выполнено моделирование следующих дисциплин и соответствующих им элементов, приведенных ниже в таблице.

Требования к составу ЦИМ

| № п/п | Дисциплина | Состав элементов |
|-------|---|---|
| 1 | Архитектурные решения | – стены; – потолки; – полы |
| 2 | Конструктивные решения | – железобетонные конструкции; – металлические конструкции |
| 3 | Технологические решения | – трубопроводы и воздуховоды; |
| 4 | Системы водоснабжения и водоотведения и пожаротушения | – запорно-регулирующая арматура; – опоры трубопроводные и изоляция; |
| 5 | Системы отопления, вентиляции и кондиционирования | – соединительные детали трубопроводов и воздуховодов; – оборудование; – датчики |
| 6 | Электроснабжение и электрическое освещение | – кабельные лотки; – распределительные щиты, щиты освещения, щиты управления оборудованием; – трансформаторы; – светильники; – розетки, выключатели, пульты управления |
| 7 | Слаботочные системы | – оборудование пожарной сигнализации; – оборудование охранной сигнализации; – оборудование сетей связи; – оборудование систем автоматизации; – оборудование видеонаблюдения |

Приведем этапы выполнения работ по созданию ЦИМ.

1. **Рекогносцировка объекта** была выполнена для уточнения границ съемки, определения наличия исходных геодезических пунктов, конфигурации зданий и их этажности, наличия площадок обслуживания, плотности застройки, состава оборудования и типов инженерных систем, а также состояния технической документации.

2. **Разработка технических требований.** По результатам рекогносцировки и требований заказчика были разработаны EIR (разработчик — заказчик), учитывающие все особенности проекта, ТЗ на разработку ЦИМ и лазерное сканирование (составитель — подрядчик).

3. **Создание геодезической сети.** Для последующего внешнего ориентирования данных лазерного сканирования от исходных пунктов была развита геодезическая сеть [13], включающая в себя опорную и сканерную сеть. Координаты опорных пунктов определили ГНСС-методом в режиме Real

Time Kinematic с поправками от сети референцных ГНСС-станций. Контроль выполнили повторным определением координат всех пунктов в другой день. Сканерную сеть проложили по периметру объектов между пунктами опорной сети.

Взаимное ориентирование точечных моделей выполнено с применением итерационного алгоритма ближайших точек, а внешнее ориентирование — аналитическим методом с использованием специальных марок. При этом был создан каталог координат марок, полученный в ходе уравнивания построенной опорной сети, и трансформирован в единую модель. Дальнейшее трансформирование пространственных координат в заданную систему было выполнено с помощью преобразования Гельмерта.

4. Наземное лазерное сканирование. Съемка объектов была выполнена с применением наземных лазерных сканеров *Leica Scan Station P40* (средняя квадратическая ошибка (СКО) измерения углов — 8", СКО измерения расстояний — 1,5 мм при расстоянии до 100 м) и *Leica RTC360* (СКО измерения углов — 18", СКО измерения расстояний 1,0 мм при расстоянии до 130 м). С учетом высоких требований к детализации ЦИМ места установки приборов определялись с учетом 60–70% области перекрытия со смежных станций для более точной идентификации конструкций и оборудования в процессе постобработки. Измерения с одной станции выполнялись с разрешением сканирования $6,3 \times 6,3$ мм на 10 м. Расстояние между смежными станциями не превышало 5–7 м. При съемке офисного здания использовали 164 станции лазерного сканирования, промышленного — 405 станций. Кроме этого, производилась панорамная фотосъемка, по результатам которой был создан реалистичный панорамный фототур, позволивший упростить идентификацию объектов и сократить трудозатраты на поиск необходимой информации для создания ЦИМ.

Взаимное ориентирование точечных моделей производилось в программном продукте *Cyclone* методом *Visual Registration (2D Scan Thumbnails)*, который основан на итерационном алгоритме ближайших точек. Взаимное ориентирование выполнялось последовательно, каждая последующая точечная модель ориентировалась относительно предыдущей до тех пор, пока все точечные модели не были объединены в единую точечную модель. При этом было выполнено «замыкание» сети станций лазерного сканирования и создание дополнительных «узловых станций», что позволило получить сеть взаимосвязанных станций, которая повысила точность определения положения станций лазерного сканирования. Для взаимного ориентирования станций лазерного сканирования в единую точечную модель была выполнена:

- для офисного здания — 741 взаимосвязь с СКО взаимного ориентирования 0,007 м;
- для промышленного здания — 4332 взаимосвязи с СКО взаимного ориентирования 0,012 м.

5. Сбор технической документации. Для наполнения ЦИМ технической информацией об объектах результатов лазерного сканирования недостаточно. В связи с этим на объектах была собрана вся доступная техническая документация, включающая планы зданий, размещения оборудования и сетей, схемы коммуникаций, принципиальные схемы, однолинейные схемы электроснабжения и спецификации. Так как существующая документация практически потеряла актуальность за время эксплуатации объекта, а исполнительная документация содержала множество неточностей, дополнительно было проведено обследование объектов с составлением:

- перечня типов инженерных систем и подключенного к ним оборудования;
- перечня технологического оборудования;
- перечня щитов распределения электроэнергии и подключенных к ним электропотребителей;

– плана выходов и входов коммуникаций с определением скрытых участков для дальнейшего обследования трассировки трубопроводов и воздуховодов;

– план расположения оборудования пожарной и охранной сигнализации, сетей связи и видеонаблюдения и систем автоматизации.

6. Настройка программной среды. При создании ЦИМ настройки самой программной среды могут быть различными в зависимости от используемого программного обеспечения (ПО). В рассматриваемом примере, согласно требованиям EIR, настоящий проект разрабатывался в ПО Revit версии 2022.

Настройки программной среды выполнялись в следующей последовательности:

- *Создание структуры файлов проекта.*
- *Настройка системы координат.*
- *Создание типов систем для инженерных коммуникаций.*
- *Общие настройки.*

7. Разработка эксплуатационной ЦИМ. Процесс формирования ЦИМ был разделен на два этапа: 1) формирование геометрической 3D-модели, содержащей в себе информацию о габаритах и расположении конструкций, оборудования и коммуникаций; 2) формирование атрибутивной информации, основанной на технической документации и результатах обследований.

Отдельным этапом разработки ЦИМ являлась трассировка скрытых трубопроводов и воздуховодов. Для решения этой задачи были выполнены анализ технической документации и дополнительные обследования здания. Каждый такой скрытый участок анализировался со службой эксплуатации зданий, и на основании вынесенного решения выполнялась трассировка в модели с внесением комментариев.

8. Выпуск документации. По завершении процесса моделирования цифровой информационной модели была выпущена техническая документация

по каждой из дисциплин, включающая поэтажные планы зданий, планы размещения оборудования и электрооборудования, планы размещения коммуникаций, схемы систем коммуникаций, однолинейные схемы электроснабжения, принципиальные схемы автоматизации, структурные схемы и спецификации. Часть документации (планы и схемы) ПО Revit позволяет автоматически создать на основе модели с последующим оформлением по требованиям. Однолинейные и принципиальные схемы создали в полуавтоматическом режиме.

9. Контроль качества ЦИМ. В процессе разработки ЦИМ и по ее завершении выполнялся контроль качества ЦИМ, который включал в себя проверку:

- ЦИМ на наличие всех требуемых объектов путем сравнения модели с единой точечной моделью, фототуром и результатами обследований;
- на коллизии элементов модели;
- на подключение трубопроводов и воздуховодов к оборудованию и назначение систем;
- на полноту заполнения атрибутивной информации;
- на соблюдения правил наименований;
- на дублирующиеся элементы, а также удаление неиспользуемых семейств из проекта.

Таким образом, внедрение ЦИМ в настоящее время весьма актуально. В том числе это относится как к новым, так и к реконструкции старых промышленных зданий.

Рассмотрены различные виды ЦИМ (проектная, исполнительная и эксплуатационная). Приведены общие данные об основных этапах формирования различных цифровых моделей.

Поэтапно рассмотренный вариант реализации эксплуатационной ЦИМ позволяет говорить о сложном и многоэтапном процессе разработки ЦИМ, требующем коммуникации подрядчика с заказчиком на протяжении всего проекта, четко сформированных документов, регламентирующих разработку ЦИМ, и компетентной команды разработчиков.

Список источников

1. Штиглиц М. С. Формирование открытых общественных пространств на основе исторических промышленных комплексов Санкт-Петербурга / М. С. Штиглиц // Искусство и дизайн: история и практика: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. — СПб.: СПГХПА им. А. Л. Штигица, 2024. — С. 81–88.
2. Nefědov V. European Trends of Industrial Territories Transformation and their Manifestation in Saint Petersburg / V. Nefědov, M. Stiglic // Word Applied Sciences Journal. — 2013. — Iss. 23. — Pp. 70–73.
3. Banerjee R. Reconstruction of Contested Landscape: Detecting Land Cover Transformation Hosting Cultural Heritage Sites from Central India Using Remote Sensing / R. Banerjee, P. K. Srivastava // Land Use Policy. — 2013. — Iss. 34. — Pp. 193–203.
4. Skaloř J. Landscape Memory and Landscape Change in Relation to Mining / J. Skaloř, I. Kařparov // Ecological Engineering. — 2012. — Iss. 43. — Pp. 60–69.
5. Lovell L. J. Building Information Modelling Facility Management (BIM-FM) / L. J. Lovell, R. J. Davies, D. V. L. Hunt // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14. — Iss. 10. — P. 3977.
6. Архитектурная фотограмметрия: официальный сайт. — СПб., 2006. — URL: <https://photogrammetria.ru/386-promyshlennoe-3d-modelirovanie-zdaniy-i-sooruzhenij.html> (дата обращения: 30.05.2025).
7. Архитектурная фотограмметрия: официальный сайт. — СПб., 2006. — URL: <https://photogrammetria.ru/356-sozдание-tochnyh-3d-modelej-promyshlennyh-obektov.html> (дата обращения: 30.05.2025).
8. Czerniawski T. Automated digital modeling of existing buildings: A review of visual object recognition methods / T. Czerniawski, F. Leite // Automation in Construction. — 2020. — Vol. 113. — P. 103131.

9. Ovsiannikova T. Yu. Building information modelling systems: strategic objectives and realities of digital transformation in construction / T. Yu. Ovsiannikova, A. A. Patsukov // Real Estate: Economics, Management. — 2022. — Iss. 1. — Pp. 13–18.

10. Jarzbek-Rychard M. Modeling of 3D geometry uncertainty in Scan-to-BIM automatic indoor reconstruction / M. Jarzbek-Rychard, H.-G. Maas // Automation in Construction. — 2023. — Vol. 154. — P. 105002.

11. Новоселов Д. Б. Применение наземных лазерных сканеров при геодезическом сопровождении строительства горнодобывающих промышленных предприятий / Д. Б. Новоселов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Т. 1. — С. 104–112.

12. Sharafutdinova A. A. Asset information model requirements for industrial facility / A. A. Sharafutdinova, M. Ja. Bryn, R. A. Sharafutdinov // Eurasian Mining. — 2023. — Iss. 2. — Pp. 104–109.

13. Шарафутдинова А. А. Методика проектирования и построения геодезической сети при наземном лазерном сканировании крупных промышленных объектов / А. А. Шарафутдинова, М. Я. Брын // Вестник СГУГиТ. — 2022. — Т. 27. — № 2. — С. 72–85.

Дата поступления: 30.05.2025

Решение о публикации: 31.07.2025

Контактная информация:

ШАРАФУТДИНОВА Анжелика Алексеевна — канд. техн. наук; anzhelikaalexeevna@gmail.com

БРЫНЬ Михаил Ярославович — д-р техн. наук, проф.; 3046921@mail.ru

ТРЕТЬЯКОВА Елена Германовна — канд. арх., доц.; elena.trety@yandex.ru

ИВАНОВА Жанна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; symava@mail.ru

Experience in Building Information Model (BIM) for Industrial Buildings

A. A. Sharafutdinova¹, M. Ya. Bryn², E. G. Tretyakova², Zh. V. Ivanova²

¹Trimetari Consulting LLC, 12, bld. 7, Marshal Blucher pr., Saint Petersburg, 195197, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Sharafutdinova A. A., Bryn M. Ja., Tretyakova E. G., Ivanova Zh. V. Experience in Building Information Model (BIM) for Industrial Buildings // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 776–789. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-776-789

Summary

Purpose: To demonstrate the necessity of implementing a Building Information Model (BIM) throughout the life cycle of industrial buildings. **Methods:** At present, Building Information Modelling (BIM) technologies have become a mandatory component at all stages of a building's life cycle for various purposes, from design and construction to demolition. In this regard, this paper showcases the diverse range of practical BIM applications. Furthermore, it reveals the peculiarities of the approach to issues related to the design and reconstruction of industrial buildings, as well as alternatives for their redevelopment. Additionally, it analyses the documents that regulate BIM requirements. Finally, it presents a variant for realising a project using BIM development for an industrial object, and considers creating a digital model. **Results:** A methodology for developing an operational Building Information Modelling (BIM) process based on terrestrial laser scanning has been established. This includes architectural and construction solutions, technical documentation and others. **Practical significance:** The necessity and expediency of implementing BIM in the design, construction and reconstruction of industrial facilities is demonstrated using a specific example.

Keywords: Building information model, industrial facility, redevelopment, terrestrial laser scanning, Revit software.

References

1. Shtiglits M. S. Formirovanie otkrytykh obshchestvennykh prostranstv na osnove istoricheskikh promyshlennykh kompleksov Sankt-Peterburga [Formation of open public spaces based on historical industrial complexes of St. Petersburg]. *Iskusstvo i dizain: istoriya i praktika* [Art and design: history and practice]. 2024, pp. 81–88. (In Russian)
2. Nefedov V., Stiglic M. European Trends of Industrial Territories Transformation and their Manifestation in Saint Petersburg. *Word Applied Sciences Journal*. 2013, Iss. 23, pp. 70–73.
3. Banerjee R., Srivastava P. K. Reconstruction of Contested Landscape: Detecting Land Cover Transformation Hosting Cultural Heritage Sites from Central India Using Remote Sensing. *Land Use Policy*. 2013, Iss. 34, pp. 193–203.
4. Skalosh J., Kashparova I. Landscape Memory and Landscape Change in Relation to Mining. *Ecological Engineering*. 2012, Iss. 43, pp. 60–69.
5. Lovell L. J., Davies R. J., Hunt D. V. L. Building Information Modelling Facility Management (BIM-FM). *Applied Sciences*. 2024, Vol. 14, Iss. 10, p. 3977.
6. *Arkhitekturnaya fotogrammetriya* [Architectural photogrammetry]: official website. Available at: <https://photogrammetria.ru/386-promyshlennoe-3d-modelirovanie-zdanij-i-sooruzhenij.html> (accessed: May 30, 2025). (In Russian)
7. *Arkhitekturnaya fotogrammetriya* [Architectural photogrammetry]: official website. Available at: <https://photogrammetria.ru/356-sozdanie-tochnykh-3d-modelej-promyshlennykh-obektov.html> (accessed: May 30, 2025). (In Russian)

8. Czerniawski T., Leite F. Automated digital modeling of existing buildings: A review of visual object recognition methods. *Automation in Construction*. 2020, vol. 113, p. 103131.
9. Ovsianikova T. Yu., Patsukov A. A. Building information modelling systems: strategic objectives and realities of digital transformation in construction. *Real Estate: Economics, Management*. 2022, Iss. 1, pp. 13–18.
10. Jarzbek-Rychard M., Maas H.-G. Modeling of 3D geometry uncertainty in Scan-to-BIM automatic indoor reconstruction. *Automation in Construction*. 2023, vol. 154, p. 105002.
11. Novoselov D. B. *Primenenie nazemnykh lazernykh skanerov pri geodezicheskom soprovozhdenii stroitel'stva gornodobyvayushchikh promyshlennykh predpriyatiy* [Application of ground-based laser scanners in geodetic support of mining industrial enterprises construction]. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. 2022, vol. 1, pp. 104–112. (In Russian)
12. Sharafutdinova A. A., Bryn M. Ja., Sharafutdinov R. A. Asset information model requirements for industrial facility. *Eurasian Mining*. 2023, Iss. 2, pp. 104–109.
13. Sharafutdinova A. A. *Metodika proektirovaniya i postroeniya geodezicheskoy seti pri nazemnom lazernom skanirovanii krupnykh promyshlennykh ob'ektov* [Methodology for designing and constructing a geodetic network for ground-based laser scanning of large industrial facilities]. *Vestnik SGUGiT* [Bulletin of SSUGiT]. 2022, vol. 27, Iss. 2, pp. 72–85. (In Russian)

Received: May 30, 2025

Accepted: July 31, 2025

Author's information:

Anzhelika A. SHARAFUTDINOVA —
PhD in Engineering; anzhelikaalexeevna@gmail.com
Mikhail Ya. BRYN — Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor; 3046921@mail.ru
Elena G. TRETYAKOVA — PhD in Architecture,
Associate Professor; elena.trety@yandex.ru
Zhanna V. IVANOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; symava@mail.ru

УДК 621.39

Методика оценки устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, функционирующей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов

А. К. Канаев¹, Е. В. Опарин², Е. В. Опарина¹

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

²ЗАО «Институт телекоммуникаций», Российская Федерация, 194100, Санкт-Петербург, Кантемировская, 5, к. 5, лит. М

Для цитирования: Канаев А. К., Опарин Е. В., Опарина Е. В. Методика оценки устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, функционирующей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 790–801. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-790-801

Аннотация

Цель: Построить методику, позволяющую проводить оценку устойчивости систем частотно-временного обеспечения, подверженных воздействию дестабилизирующих факторов различного характера. **Методы:** Методы системного анализа, положения теории формирования сетей тактовой сетевой синхронизации и систем единого времени, методы анализа надежности, живучести и устойчивости технических систем, а также методы математического моделирования и теории вероятностей. **Результаты:** Построена методика, позволяющая проводить оценку устойчивости систем частотно-временного обеспечения, подверженных воздействию дестабилизирующих факторов, в основе которой лежит оценка показателей надежности и живучести. Построенная методика позволяет отразить качество процесса функционирования систем частотно-временного обеспечения при воздействии различных дестабилизирующих факторов, что в последствии является основой для выработки управленческих решений в условиях дестабилизирующих воздействий. **Теоретическая значимость:** Заключается в расширении области применения теории надежности и живучести систем для оценки устойчивости процесса функционирования сетей электро-связи и систем частотно-временного обеспечения, учитывая при этом тот факт, что устойчивость сетей электро-связи и ее подсистем сложно оценить классическими методами. **Практическая значимость:** Заключается в создании научно обоснованных предложений обеспечения требуемой устойчивости процесса функционирования систем частотно-временного обеспечения в условиях воздействия дестабилизирующих факторов естественного и искусственного характера вследствие отсутствия комплексной проработки вопросов доставки сигналов точного времени и частоты в условиях, отличных от нормативных.

Ключевые слова: Устойчивость, надежность, живучесть, частотно-временное обеспечение, злоумышленник, дестабилизирующий фактор, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности.

Введение

Устойчивость процесса функционирования современных и перспективных телекоммуникационных систем (ТКС) существенно зависит от системы частотно-временного обеспечения (ЧВО), входящей в ее состав. Современные

тенденции развития ТКС, такие как применение новых сетевых технологий, непрерывный рост абонентов, а также повышение требований к качеству обслуживания, влекут за собой ужесточение требований к процессу функционирования ЧВО.

Современные системы ЧВО включают в свой состав устройства тактовой сетевой синхронизации (ТСС), а также аппаратуру, необходимую для временной или фазовой синхронизации.

Таким образом, при построении современных систем ЧВО актуальна задача построения комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, концептуальная модель которой приведена на рис. 1.

Эталонным источником сигналов единого времени и частоты для современных и перспективных систем ЧВО является инфраструктура Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли России (ГСВЧ). Ниже по иерархии расположены источники сигналов тактовой сетевой синхронизации и системы единого времени (СЕВ), примеры которых приведены на рис. 1.

Ключевые потребители услуг систем ЧВО в технологических сетях связи также приведены на рис. 1, среди основных потребителей стоит выделить системы электронного документооборота, автоматизированные системы управления, оборудование *IoT* (*Internet of Things*), а также дистанционной эксплуатации объектов [1–6].

Процесс функционирования систем ЧВО подвержен воздействию дестабилизирующих факторов различного вида и характера. Нарушение работы систем ЧВО может существенно снизить эффективность функционирования ТКС вплоть до полного прекращения предоставления услуг связи.

1. Влияние дестабилизирующих воздействий на системы частотно-временного обеспечения

Системы частотно-временного обеспечения подвергаются воздействиям дестабилизирующего характера, в результате чего снижается устойчивость как систем ЧВО, так и самих телекоммуникационных систем.

В целом дестабилизирующие факторы можно сгруппировать на дестабилизирующие факторы естественного и искусственного происхождения.

Традиционными воздействиями искусственного происхождения являются действия организованного злоумышленника (рис. 2), среди которых следует выделить:

- манипулирование синхросигналами;
- спуфинг;
- подмену роли устройств в сетях синхронизации и единого времени;
- DoS-атаки различных видов;
- атаки непосредственно против протоколов систем ЧВО [1, 7, 8].

Следует отметить, что отказ или нарушение процесса функционирования отдельных источников сигналов единого времени и частоты может привести к отказам элементов ЧВО, расположенных ниже по иерархии. Принимая во внимание указанный факт, злоумышленники, как правило, пытаются воздействовать на узлы, имеющие самый высокий уровень иерархии.

Проведенный анализ сценариев потенциальных атак на системы ЧВО показал, что наиболее деструктивными являются атаки на систему управления (СУ) ЧВО. Современные системы ЧВО проектируются таким образом, что отказы отдельных их элементов не приводят сразу к отказу всей системы ЧВО. В то же время реализация атаки на СУ ЧВО способно молниеносно привести к приостановлению процесса функционирования всей системы [1, 7, 8].

2. Оценка устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

Учитывая высокое количество внутренних и внешних дестабилизирующих воздействий на элементы системы частотно-временного обеспечения, большую актуальность приобретает задача обеспечения ее устойчивости. В соответ-

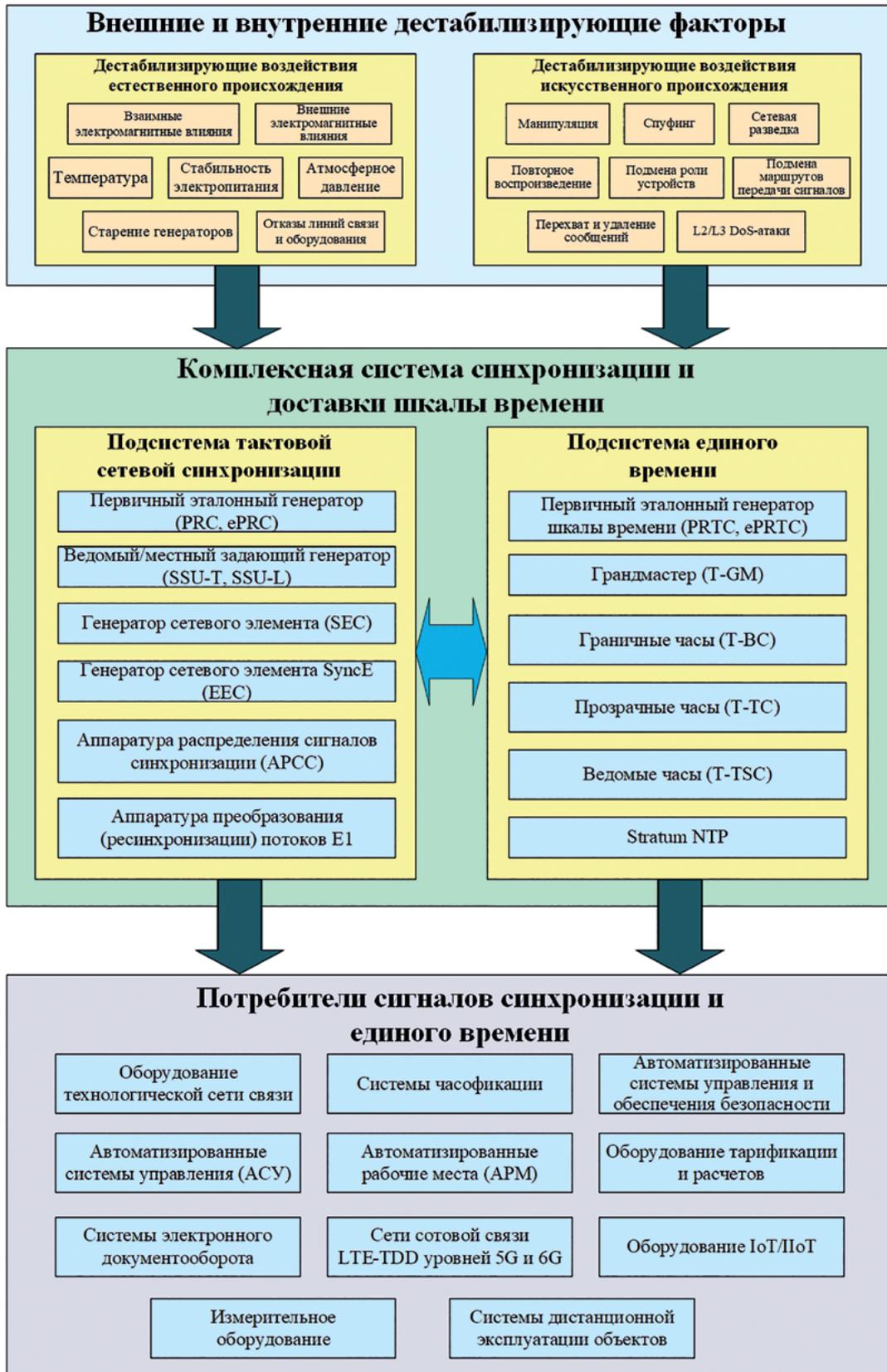


Рис. 1. Модель системы частотно-временного обеспечения, функционирующей в составе распределенной ТКС технологического назначения



Рис. 2. Модель информационного воздействия организованного злоумышленника на комплексную систему синхронизации и доставки шкалы времени

ствии с ГОСТ Р 53111—2008 устойчивость комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени будем представлять как ее способность выполнять функции частотно-временного обеспечения в случае возникновения отказов в результате воздействия дестабилизирующих факторов.

Способность противостоять внутренним дестабилизирующим факторам определяется надежностью системы ЧВО, а способность противостоять внешним дестабилизирующим факторам — живучестью системы ЧВО.

Первоначальный этап оценки устойчивости функционирования систем ЧВО заключается в определении ущерба от дестабилизирующих факторов на основе установленных критериев ущерба. Для систем ТСС в соответствии с утвержденными нормативными документами [1–4] выделяются три категории качества синхронизации:

a , b и c . Категория качества a соответствует режиму функционирования ТСС с показателями качества, соответствующими нормативным значениям. Категория качества b соответствует режиму незначительных отказов. Категория качества c недопустима и предназначена для работ по монтажу и перестройке цепей синхронизации.

Требования к процессу функционирования ТСС в соответствии с принятыми категориями качества приведены в табл. 1.

Дополнительно стоит отметить, что в ТКС возможны следующие режимы работы тактовой синхронизации (рис. 3). Основными являются синхронный и псевдосинхронный режимы.

Для систем единого времени при использовании протоколов *NTP* и *PTP* в составе сетей передачи данных (СПД), учитывая тот факт, что метки времени передаются в составе *IP*-пакетов и *Ethernet* кадров, возможно использование сте-

Таблица 1. Требования к процессу функционирования ТСС в соответствии с принятыми категориями качества синхронизации

| Категория качества | Интенсивность проскальзываний | Значение |
|--------------------|--|---|
| <i>a</i> | Не более 5 проскальзываний за 24 часа | Не менее 98,9% времени функционирования |
| <i>b</i> | Более 5 проскальзываний за 24 часа, но менее 30 проскальзываний за 1 час | Не более 0,1% времени функционирования |
| <i>c</i> | Более 30 проскальзываний за 1 час | Не более 0,1% времени функционирования |

Рассматриваемый период функционирования ТСС не менее одного года

пеней градации ущерба, указанных в ГОСТ Р 53111—2008, а именно [9]:

- высокий (ущерб до 50%);
- средний (ущерб до 30%);
- низкий (ущерб до 10%).

Следует также отметить, что для оценки показателей устойчивости (надежности и живучести) систем связи в настоящее время широкое распространение получил математический аппарат случайных графов и нахождения связности между элементами графа с помощью метода перебора простых цепей (МППЦ). Недостатками указанного метода для рассматриваемой предметной

области является его повышенная трудоемкость, предполагающая рассмотрение всех возможных вариантов из необходимого числа связанных подграфов, что может значительно усложнить расчеты при рассмотрении сложно разветвленных сетей связи, а также отсутствие учета специфики процесса функционирования систем ЧВО.

Учитывая недостатки метода перебора простых цепей, для оценки показателей надежности и живучести систем ЧВО авторами был применен математический аппарат полумарковских процессов. Математические модели процесса функционирования систем ЧВО с применением аппарата полумарковских процессов при наличии и отсутствии дестабилизирующих воздействий представлены авторами в публикациях [10–13]. В основе разработанных моделей лежит построение графов состояний системы ЧВО, которые представляют собой полумарковские процессы функционирования и восстановления систем ЧВО. Процессы функционирования и восстановления систем ЧВО носят вероятностный характер, данные процессы состоят из конечного множества состояний, которые можно охарактеризовать матрицей переходных вероятностей $P = (p_{i,j})$ и совокупностью времен пребывания в каждом конкретном состоянии t_i . Возможность

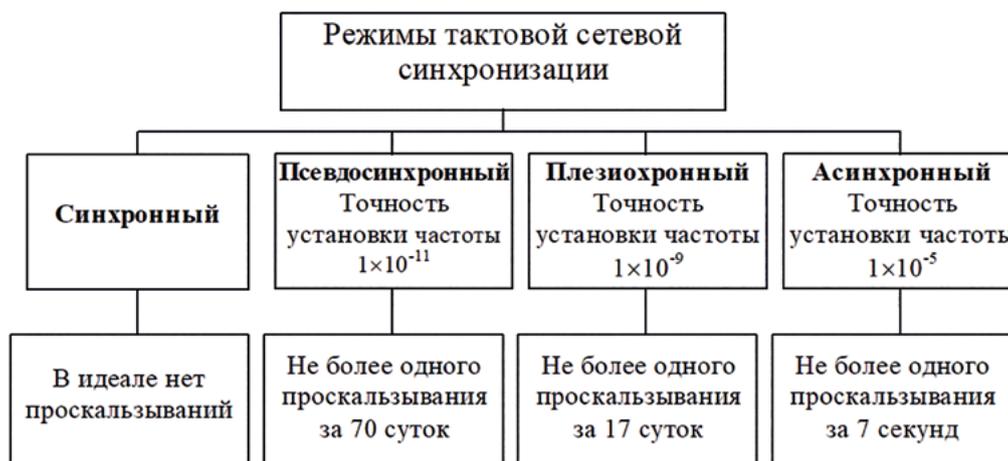


Рис. 3. Режимы работы тактовой сетевой синхронизации

применения аппарата полумарковских процессов обосновывается тем фактом, что имеет место независимость вероятностей перехода из одного состояния S_i в другое S_j от всего предыдущего развития состояний системы ЧВО до попадания в конкретное данное состояние S_p , а также имеет место независимость распределений времен пребывания в состояниях S_i от всего предыдущего развития состояний системы ЧВО [10–13].

В качестве показателя надежности подсетей комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени можно применить коэффициент готовности K_r , определяемый выражением (1) [7–9]:

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_b}, \quad (1)$$

где T_0 — среднее время наработки на отказ подсети комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени;

T_b — среднее время восстановления ее процесса функционирования.

В качестве показателя живучести подсети комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени можно применить коэффициент оперативной готовности $K_{o,r}$, определяемый выражением (2) [7–9]:

$$K_{o,r} = P(T) K_r, \quad (2)$$

где K_r — коэффициент готовности;

$P(T)$ — вероятность сохранения работоспособности при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

Таким образом, устойчивость комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени можно оценить следующими показателями: коэффициентом готовности и коэффициентом оперативной готовности.

Для оценки коэффициента готовности K_r комплексной системы синхронизации и доставки

шкалы времени можно использовать модели, разработанные авторами в [10, 14].

Исходными данными для оценки показателей надежности и коэффициента готовности K_r системы ЧВО являются: матрица переходных вероятностей $P = (p_{i,j})$ и матрица функций распределения условных случайных времен пребывания системы ЧВО в каждом из S_i состояний $F_{ij}(t)$. Указанные исходные данные могут быть определены исходя из статистики процесса функционирования систем ЧВО и паспортных данных на применяемое оборудование. В качестве допущения было принято экспоненциальное распределение функций условных случайных времен пребывания системы ЧВО в каждом из S_i состояний $F_{ij}(t)$, а в качестве оборудования систем ЧВО рассматривалось оборудование отечественных производителей, в том числе многофункциональное устройство синхронизации М100 производства ФГУП «ЛО ЦНИИС», аппаратура тактовой сетевой синхронизации «СОНАТА» производства АО НПП «КОМТЕХ», сервер точного времени «ССВ-1Г» производства ООО «КОМСЕТ-сервис».

Для оценки коэффициента оперативной готовности $K_{o,r}$, который характеризует степень противодействия внешним дестабилизирующим факторам, необходимо предварительно выделить воздействующие дестабилизирующие факторы.

Для оценки общей величины $P(T)$ необходимо составить модель воздействия каждого дестабилизирующего фактора и в соответствии с построенной моделью оценить величину $P_i(T)$. Тогда общую величину $P(T)$ можно оценить по следующей формуле (3):

$$P(T) = \prod_{i=1}^n P_i(T), \quad (3)$$

где n — общее число принимаемых во внимание внешних дестабилизирующих факторов.

С целью оценки коэффициента оперативной готовности $K_{o,r}$ рассмотрим модели воздействия

следующих атак: манипулирования, спуфинга, *DoS*-атак и сетевой разведки в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени. Указанные модели воздействия были рассмотрены авторами в публикациях [11–13, 15].

В основе разработанных авторами моделей информационных воздействий также лежит применение аппарата полумарковских процессов, при котором производится построение графов состояний, отражающих действия злоумышленника на определенном этапе информационных атак. Разработанные модели [11–13, 15] позволяют определить среднее время атаки и среднее время восстановления работоспособности комплексной системы синхронизации и доставки шкалы от последствий реализации атаки, коэффициент исправного действия систем ЧВО, а также вероятность сохранения работоспособности систем ЧВО от интенсивности воздействий организованного злоумышленника и интенсивности действий систем информационного безопасности. В качестве допущения при расчетах также применялось экспоненциальное распределение функций условных случайных времен пребывания системы ЧВО в каждом из S_i состояний $F_{ij}(t)$ при воздействии организованного злоумышленника.

Следует отметить, что разработанные модели информационных воздействий [11–13, 15] отличаются учетом всех основных этапов противоборства организованного злоумышленника и систем информационной безопасности комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени и позволяют оценивать вероятностно-временные характеристики процесса противоборства, а также степень защищенности комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, причем как совместно, так и для каждого отдельного рубежа защиты систем ЧВО.

Согласно таблице 3 ГОСТ Р 53111—2008 [9], для рассматриваемых систем ЧВО возможно применение также следующих градаций вероятности

сохранения работоспособности элементов систем ЧВО $P(T)$ исходя из причиненного ущерба:

- ущерб до 50 % ($P(T) = 0,5$);
- ущерб до 30 % ($P(T) = 0,7$);
- ущерб до 10 % ($P(T) = 0,9$).

Расчету показателей надежности комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени должен предшествовать этап нормирования технических показателей надежности сети электросвязи, в которой функционирует система ЧВО. Для сетей передачи данных, в которых организовано функционирование протоколов *NTP* и *RTP*, значение коэффициента готовности K_T должно составлять не менее 0,99 [9].

На основании результатов моделирования процесса функционирования и восстановления сети ТСС, рассмотренных авторами в публикациях [10, 14], был вычислен коэффициент готовности комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени ($K_T = 0,998$).

На основе выражения (3) можно вычислить вероятность $P(T)$ при воздействии выделенных внешних дестабилизирующих факторов согласно выражению (4). Отдельные вероятности сохранения работоспособности $P(T)$ при реализации рассматриваемых видов атак были рассмотрены авторами в публикациях [11–13, 15].

$$\begin{aligned} P(T) &= \prod_{i=1}^n P_i(T) = \\ &= K_{и}^{\text{ман}} \cdot K_{и}^{\text{спуф}} \cdot K_{и}^{\text{DoS}} \cdot K_{и}^{\text{развед}} = \\ &= 0,983 \cdot 0,946 \cdot 0,889 \cdot 1 = 0,827, \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_{и}^{\text{ман}}$ — коэффициент исправного действия системы ЧВО при манипулировании сообщениями, содержащими сигналы частотно-временного обеспечения;

$K_{и}^{\text{спуф}}$ — коэффициент исправного действия системы ЧВО при реализации атаки спуфинга;

$K_{и}^{\text{DoS}}$ — коэффициент исправного действия системы ЧВО при реализации *DoS*-атак;

$K_{\text{и}}^{\text{развед}}$ — коэффициент исправного действия системы ЧВО при ведении сетевой разведки, данный коэффициент принят равным единице, при допущении, что при ведении злоумышленником сетевой разведки дестабилизирующих воздействий, нарушающих процесс передачи частотно-временных сигналов, не оказывается.

На основании выражения (4) можно вычислить коэффициент оперативной готовности $K_{\text{о.г}}$ по выражению (5):

$$K_{\text{о.г}} = P(T)K_{\text{г}} = 0,827 \cdot 0,998 = 0,825. \quad (5)$$

В ГОСТ Р 53111—2008 проведено деление потребителей услуг сетей связи на обычных потребителей и спецпотребителей 1-й, 2-й и 3-й категорий, включающих центральные, региональные, местные органы государственного управления, а также органы управления субъектов Российской Федерации. Следует отметить, что разработанная методика оценки устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени вполне применима как для обычных потребителей, так и для спецпотребителей.

Учитывая тот факт, что расчет устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени проведен для категории обычных потребителей, коэффициент оперативной готовности $K_{\text{о.г}}$ системы ЧВО должен быть не ниже 0,8 для низкого уровня ущерба [9]. В нашем случае $K_{\text{о.г}}$ составляет 0,825, что удовлетворяет указанным в ГОСТ Р 53111—2008 требованиям и соответствует низкому уровню нанесенного ущерба.

Следует также отметить, что для достижения требуемого уровня устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени необходима соответствующая система резервирования. Учет системы резервирования выполнен путем включения в разработанную авторами модель процесса функционирования и восстановления системы ЧВО [10, 14] ряда

дополнительных состояний: выбор узла размещения и включение альтернативного первичного источника синхронизации; диагностирование элементов ЧВО встроенными средствами технической диагностики и их восстановление согласно результатам; перестроение ЧВО со структурой, оптимальной по интегральному критерию качества.

Блок-схема разработанной методики оценки устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени представлена на рис. 4.

Представленная методика (рис. 4) представляет собой структурированную последовательность действий, включающую в себя предварительное определение критериев уровней ущерба для комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени (блок 1), определение градаций ущерба (блок 2), сбор необходимых исходных данных для построения модели процесса функционирования системы ЧВО (блок 3) и моделей воздействия дестабилизирующих факторов (блок 7), формирования указанных моделей (блоки 4, 5, 8, 9) и вычисления показателей, на основе которых производится оценка устойчивости (блоки 6, 9).

Заключение

Комплексная система синхронизации и доставки шкалы времени является основополагающим элементом ТКС. В данной статье на основе проведенных исследований изложена методика, позволяющая провести оценку ее устойчивости через оценку надежности и живучести. В качестве показателя надежности предложено использование коэффициента готовности $K_{\text{г}}$ комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, в качестве показателя живучести предложено использование коэффициента оперативной готовности $K_{\text{о.г}}$ комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени.

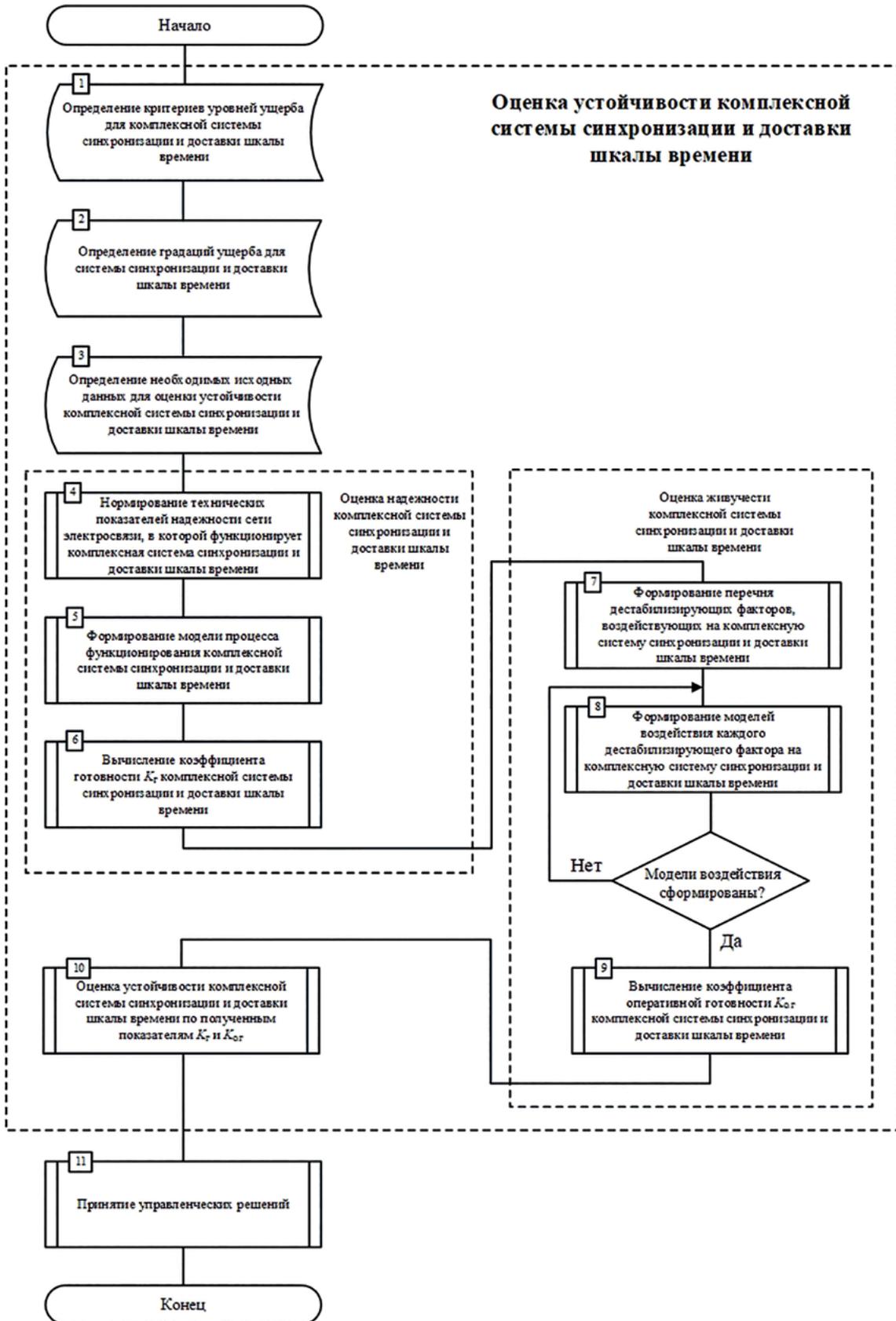


Рис. 4. Блок-схема методики оценки устойчивости комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

Построенная методика позволяет оценить качество процесса функционирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, что впоследствии может найти отражение в принятии обоснованных решений по ее управлению.

Список источников

1. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: учебное пособие для вузов / А. В. Рыжков. — М.: Горячая линия — Телеком, 2021. — 270 с.
2. Мазуренко Д. К. Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов / Д. К. Мазуренко // Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2017. — Т. 11. — № 8. — С. 4–8.
3. Мазуренко Д. К. Эксплуатация оборудования системы синхронизации сигналов в сетях, построенных на технологии коммутации пакетов и в сетях 5G / Д. К. Мазуренко, Д. А. Пальцин, А. С. Фень // Электро-связь. — 2022. — № 12. — С. 14–17.
4. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи / А. В. Рыжков, А. Ю. Насонов // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2019. — Т. 10. — № 1. — С. 49–52.
5. Рыжков А. В. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезиохронных до когерентных сетей / А. В. Рыжков, М. Л. Шварц // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2021. — Т. 12. — № 4. — С. 27–38.
6. Канаев А. К. Рекомендации МСЭ-Т в области синхронизации инфотелекоммуникационных систем / А. К. Канаев, А. К. Тоцев // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 10. — С. 8–14.
7. Коцыняк М. А. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства / М. А. Коцыняк, А. И. Осадчий, М. М. Коцыняк, О. С. Лаута и др. — СПб.: Типография Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2014. — 126 с.
8. Лаута О. С. Методика повышения устойчивости ИТКС в условиях воздействия противника на основе определения опорного варианта / О. С. Лаута, С. А. Багрецов, Э. А. Бударин, М. В. Митрофанов // Электро-связь. — 2020. — № 9. — С. 64–68.
9. ГОСТ Р 53111—2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.
10. Канаев А. К. Формирование модели процесса функционирования и восстановления сети тактовой сетевой синхронизации в условиях применения автоматизированной системы поддержки принятия решений. Электронный ресурс / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, А. К. Тоцев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2011. — № 1. — С. 41–55.
11. Канаев А. К. Обобщенная модель действий злоумышленника при манипулировании сообщениями, содержащими сигналы точного времени / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина // Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2022. — Т. 16. — № 6. — С. 31–37.
12. Опарин Е. В. Обобщенная модель действий злоумышленника при реализации DoS-атаки на комплексную систему синхронизации и доставки шкалы времени / Е. В. Опарин // Информация и космос. — 2024. — № 2. — С. 93–101.
13. Канаев А. К. Полумарковская модель деятельности злоумышленника при реализации атаки спуфинга в подсистеме единого времени / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина // Ракетно-космическое приборостроение информационные системы. — 2022. — Т. 9. — № 4. — С. 9–16.
14. Канаев А. К. Имитационная модель процесса функционирования и восстановления сети тактовой сетевой синхронизации / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, М. А. Сахарова // Информатизация и связь. — 2020. — № 4. — С. 83–90.
15. Канаев А. К. Имитационная модель процесса реализации атаки на систему управления сетью синхронизации / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина, М. А. Сахарова // Информация и космос. — 2023. — № 1. — С. 112–118.

Дата поступления: 29.03.2025

Решение о публикации: 18.05.2025

Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — д-р техн. наук, проф.; kanaevak@mail.ru
ОПАРИН Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, доц.; ОпаринH@mail.ru
ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доц.; syrayaekaterina@mail.ru

Assessing the Stability of an Integrated Timescale Synchronization and Delivery System Operating Under the Influence of Destabilizing Factors

A. K. Kanaev¹, E. V. Oparin², E. V. Oparina¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²JSC “Institute of Telecommunications”, 5, bld. 5, lit. M, Kantemirovskaya str., Saint Petersburg, 194100, Russian Federation

For citation: Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Assessing the Stability of an Integrated Timescale Synchronization and Delivery System Operating under the Influence of Destabilizing Factors // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 790–801. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-790-801

Summary

Purpose: To develop a methodology for assessing the stability of time-frequency support systems exposed to various destabilizing factors. **Methods:** System analysis methods, the theory of network clock synchronization and unified time systems, methods for analyzing reliability, survivability and stability of technical systems, methods of mathematical modelling, and probability theory. **Results:** A methodology has been developed for evaluating the stability of time-frequency support systems exposed to destabilizing factors, based on reliability and survivability assessment. The developed methodology makes it possible to reflect the quality of time-frequency support system functioning under the influence of various destabilizing factors. Subsequently, it will form the basis for managerial decision-making under conditions of destabilizing influences. **Theoretical significance:** This methodology will allow a wide application of the system reliability and survivability theory ensuring the functional stability of telecommunication networks and time-frequency systems, as the stability of telecommunication networks and its subsystems is difficult to assess using traditional methods. **Practical significance:** The scientifically-based proposals mentioned above focus on ensuring the required stability of the functioning of time-frequency support systems under the influence of destabilizing factors, both natural and artificial, due to the lack of comprehensive study of the accurate time and frequency signal delivery outside of regular environments.

Keywords: Stability, reliability, survivability, time-frequency support, attacker, destabilizing factor, readiness coefficient, operational readiness coefficient.

References

1. Ryzhkov A. V. *Chastotno-vremennoe obespechenie v setyakh elektrosvyazi: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Frequency-time support in telecommunications networks: textbook for universities]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2021. 270 p. (In Russian)

2. Mazurenko D. K. Aspekty postroeniya sistemy chastotno-vremennoy setevoy sinkhronizatsii signalov [Aspects of building a frequency-time network signal synchronization system]. *T-Comm — Telekommunikatsii i*

Transport [T-Comm — Telecommunications and Transport]. 2017, vol. 11, Iss. 8, pp. 4–8. (In Russian)

3. Mazurenko D. K., Pal'tsin 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 built on packet switching technology and in 5G networks]. *Elektrosvyaz'* [Electrosvyaz]. 2022. Iss. 12, pp. 14–17. (In Russian)

4. Ryzhkov A. V., Nasonov A. Yu. Chastotno-vremennoe obespechenie v setyakh elektrosvyazi [Frequency-time support in telecommunications networks]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. 2019, vol. 10, Iss. 1, pp. 49–52. (In Russian)
5. Ryzhkov A. V., Shvarts M. L. Sovremennye tendentsii razvitiya sistem setevoy sinkhronizatsii v setyakh elektrosvyazi. Ot plizokhronnykh do kogerentnykh setey [Modern trends in the development of network synchronization systems in telecommunications networks. From plesiochronous to coherent networks]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. 2021, vol. 12, Iss. 4, pp. 27–38. (In Russian)
6. Kanaev A. K., Toshchev A. K. Rekomendatsii MSE-T v oblasti sinkhronizatsii infotelekomunikatsionnykh sistem [ITU-T recommendations in the field of synchronization of infotelecommunication systems]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2018. Iss. 10, pp. 8–14. (In Russian)
7. Kotsynyak M. A., Osadchiy A. I., Kotsynyak M. M., Lauta O. S. et al. *Obespechenie ustoychivosti informatsionno-telekomunikatsionnykh setey v usloviyakh informatsionnogo protivoborstva* [Ensuring the stability of information and telecommunication networks in conditions of information confrontation]. Saint Petersburg: Tipografiya Voennoy akademii svyazi imeni Marshala Sovetskogo Soyuz S. M. Budennogo Publ., 2014, 126 p. (In Russian)
8. Lauta O. S., Bagretsov S. A., Budarin E. A., Mitrofanov M. V. Metodika povysheniya ustoychivosti ITKS v usloviyakh vozdeystviya protivnika na osnove opredeleniya opornogo varianta [Methodology for increasing the stability of ITNS under enemy influence based on determining the reference option]. *Elektrosvyaz'* [Electrosvyaz]. 2020. Iss. 9, pp. 64–68. (In Russian)
9. GOST R 53111—2008. *Ustoychivost' funktsionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody proverki* [GOST R 53111—2008. Stability of operation of public communication network. Requirements and verification methods]. (In Russian)
10. Kanaev A. K., Oparin E. V., Toshchev A. K. Formirovanie modeli protsessa funktsionirovaniya i vosstanovleniya seti taktovoy setevoy sinkhronizatsii v usloviyakh primeneniya avtomatizirovannoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy Formation of a model of the functioning and recovery process of the clock network synchronization network under conditions of using an automated decision support system [Electronic resource]. *Byulleten' rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results]. 2011. Iss. 1, pp. 41–55. (In Russian)
11. Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Obobshchennaya model' deystviy zloupotrebiteleya pri manipulirovaniy soobshcheniyami, sodержashchimi signaly tochnogo vremeni [Generalized model of attacker actions when manipulating messages containing precise time signals]. *T-Comm — Telekommunikatsii i Transport* [T-Comm — Telecommunications and Transport]. 2022, vol. 16, Iss. 6, pp. 31–37. (In Russian)
12. Oparin E. V. Obobshchennaya model' deystviy zloupotrebiteleya pri realizatsii DoS-ataki na kompleksnyuyu sistemu sinkhronizatsii i dostavki shkaly vremeni [Generalized model of attacker actions when implementing a DoS attack on a complex synchronization and time scale delivery system]. *Informatsiya i kosmos* [Information and space]. 2024. Iss. 2, pp. 93–101. (In Russian)
13. Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Polumarkovskaya model' deyatel'nosti zloupotrebiteleya pri realizatsii ataki spufinga v podsisteme edinogo vremeni [Semi-Markov model of attacker activity when implementing a spoofing attack in the unified time subsystem]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie informatsionnye sistemy* [Rocket and space instrumentation information systems]. 2022, vol. 9, Iss. 4, pp. 9–16. (In Russian)
14. Kanaev A. K., Oparin E. V., Sakharova M. A. Imitatsionnaya model' protsessa funktsionirovaniya i vosstanovleniya seti taktovoy setevoy sinkhronizatsii [Simulation model of the functioning and recovery process of the clock network synchronization network]. *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communications]. 2020, Iss. 4, pp. 83–90. (In Russian)
15. Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V., Sakharova M. A. Imitatsionnaya model' protsessa realizatsii ataki na sistemu upravleniya set'yu sinkhronizatsii [Simulation model of the process of implementing an attack on a synchronization network control system]. *Informatsiya i kosmos* [Information and space]. 2023. Iss. 1, pp. 112–118. (In Russian)

Received: March 29, 2025

Accepted: May 18, 2025

Author's information:

Andrey K. KANAEV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor; kanaevak@mail.ru

Evgeniy V. OPARIN — PhD in Engineering, Associate

Professor; OnapuH@mail.ru

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate

Professor; syrayaekaterina@mail.ru

УДК 621.311.243 + 06

Исследование влияния температуры и освещенности поверхности солнечных фотоэлементов на их энергоэффективность

Т. Л. Риполь-Сарагоси¹, И. С. Дурнев², И. Ю. Новосельский³

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

²ООО «ЭЛСИКО», Российская Федерация, 344000, Ростов-на-Дону, Кировский пр., зд. 132/2, оф. 9

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л., Дурнев И. С., Новосельский И. Ю. Исследование влияния температуры и освещенности поверхности солнечных фотоэлементов на их энергоэффективность // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 802–810. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-802-810

Аннотация

Цель: Представить результаты исследований, посвященных анализу влияния температуры и освещенности на эффективность солнечных фотоэлементов, изготовленных из различных видов материалов. Провести сравнение характеристик кремниевых и тонкопленочных фотоэлектрических материалов. Выявить наиболее устойчивые к внешним воздействиям материалы изготовления фотоэлектрических элементов для решения вопроса о целесообразности их применения в различных климатических условиях. **Методика:** Для определения энергоэффективности солнечных фотоэлементов, изготовленных из различных кремниевых и тонкопленочных материалов, опробована методика расчета вольтамперных характеристик (ВАХ) и степень влияния на них температуры поверхности солнечного элемента (СЭ) и величины ее освещенности, а также величин последовательного (R_s) и параллельного (R_{sh}) сопротивлений, связанных с потерями и утечками токов. **Методы:** Используются методы сравнения и анализа полученных результатов, а также их графической визуализации, которые легли в основу формирования выводов и рекомендаций, а также обоснования выбора материалов изготовления солнечных фотоэлементов на основе показателя «энергоэффективность». **Практическая значимость:** Результаты представленных исследований позволяют обоснованно осуществлять выбор материалов фотоэлектрических элементов при использовании нетрадиционной солнечной энергии взамен традиционной при электрообеспечении обособленных объектов, в том числе и предприятий железнодорожной отрасли, что позволяет реализовать принцип энергоресурсосбережения на любом объекте внедрения полученных результатов.

Ключевые слова: Энергоэффективность, солнечные элементы, фотоэлектрические материалы, температурная стабильность, освещенность, коэффициент полезного действия.

Солнечная энергетика занимает ключевое место в структуре возобновляемых источников энергии, что обусловлено ее экологической безопасностью и неисчерпаемым потенциалом. В условиях глобального перехода к низкоуглеродной экономике повышение эффективности

фотоэлектрических преобразователей становится одной из приоритетных задач [1]. Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р, развитие возобновляемой энергетики

направлено на диверсификацию энергобаланса и снижение зависимости от традиционных источников. Следующим нормативным документом, обосновывающим актуальность выбранной темы исследования, является Стратегия развития ОАО «РЖД» до 2030 года. В документе определены ключевые задачи по сохранению лидирующих позиций компании в мире. К ним относятся:

- обеспечение энергоэффективности;
- обеспечение безопасности при использовании инновационных технологий и решений;
- внедрение технологий замещения традиционных источников энергии на альтернативные.

Энергоэффективность фотоэлектрических систем в значительной степени зависит от внешних факторов, таких как температура и освещенность. Эти параметры варьируются в зависимости от географического расположения, времени года и погодных условий, что требует детального изучения поведения различных типов солнечных элементов (СЭ) в широком диапазоне эксплуатационных режимов [2–4]. Целью данного исследования является анализ влияния температуры и освещенности на энергоэффективность солнечных элементов, изготовленных на основе различных материалов.

В качестве объектов исследования были выбраны четыре типа солнечных элементов: монокристаллический кремний (mono-Si), поликристаллический кремний (multi-Si), селенид меди-индия (CuInSe₂) и селенид меди-индия-галлия (CIGS). Основные параметры этих материалов, измеренные при стандартных условиях (освещенность 1000 Вт/м², температура 25 °С) [5–8], представлены в табл. 1. Данные соответствуют техническим характеристикам, заявленным производителями и представленным в журналах NREL, Solar Energy Materials & Solar Cells.

Для определения наименее и наиболее энергоэффективных видов солнечных элементов, представленных в табл. 1, проведем расчеты их

Таблица 1. Основные параметры солнечных элементов

| № | | mono-Si | multi-Si | CuInSe ₂ | CIGS |
|----|--------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 1 | $S, \text{см}^2$ | 243,4 | | | |
| 2 | $U_{oc_ref}, \text{В}$ | 0,630 | 0,670 | 0,880 | 0,805 |
| 3 | $I_{sc_ref}, \text{А}$ | 9,800 | 9,200 | 7,600 | 8,000 |
| 4 | $I_{s_ref}, \text{А}$ | $1 \cdot 10^{-10}$ | $5 \cdot 10^{-10}$ | $2 \cdot 10^{-10}$ | $3 \cdot 10^{-10}$ |
| 5 | $\eta, \%$ | 21,20 | 21,00 | 22,80 | 21,90 |
| 6 | ff | 0,837 | 0,828 | 0,831 | 0,829 |
| 7 | $\alpha_I, \%/^{\circ}\text{C}$ | +0,05 | +0,05 | +0,07 | +0,05 |
| 8 | $\beta_V, \text{В}/^{\circ}\text{C}$ | –0,003 | –0,003 | –0,003 | –0,0028 |
| 9 | $P_{\max}, \text{Вт}$ | 5,345 | 5,103 | 5,555 | 5,339 |
| 10 | $E_g, \text{эВ}$ | 1,12 | 1,10 | 1,04 | 1,15 |
| 11 | n | 1,0 | 1,1 | 1,4 | 1,3 |

Обозначения: S — площадь солнечного элемента; U_{oc_ref} — напряжение холостого хода СЭ при стандартных условиях; I_{sc_ref} — ток короткого замыкания СЭ при стандартных условиях; I_{s_ref} — обратный ток насыщения СЭ при стандартных условиях; η — коэффициент полезного действия (КПД) солнечного элемента; ff — коэффициент заполнения вольтамперной характеристики (ВАХ); α_I — температурный коэффициент тока; β_V — температурный коэффициент напряжения; P_{\max} — максимальная выходная мощность СЭ; E_g — ширина запрещенной зоны; n — диодный коэффициент.

основных электрических параметров при варьировании температуры и освещенности. Диапазон рабочей температуры солнечного элемента составил от 15 до 100 °С при фиксированной освещенности 1000 Вт/м², что соответствует паспортному диапазону изменения температуры окружающей среды от –80 до +45 °С, при этом он охватывает реальные условия эксплуатации в различных климатических зонах. Анализ влияния освещенности проводился в интервале от 200 до 1200 Вт/м² при стандартной температуре 25 °С, включая режим низкой инсоляции и экстремальной солнечной активности. Методика проведения экспериментов соответствует требованиям ГОСТ Р 56983—2016

Таблица 2. Параметры mono-Si СЭ при изменении освещенности и температуры

| Значения внешних факторов | Параметры СЭ | | | | | |
|---|--------------|-------------|-----------------------|---------------|-------|------------|
| | $U_{oc}, В$ | $I_{ph}, А$ | $I_s, А$ | $P_{max}, Вт$ | ff | $\eta, \%$ |
| Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ | | | | | | |
| 15 °С | 0,670 | 9,751 | $1,99 \cdot 10^{-11}$ | 5,513 | 0,440 | 22,70 |
| 25 °С | 0,630 | 9,800 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 5,345 | 0,837 | 21,20 |
| 50 °С | 0,605 | 9,923 | $3,70 \cdot 10^{-9}$ | 4,916 | 0,819 | 20,20 |
| 75 °С | 0,560 | 10,045 | $8,29 \cdot 10^{-8}$ | 4,480 | 0,796 | 18,40 |
| 100 °С | 0,510 | 10,168 | $1,24 \cdot 10^{-6}$ | 4,034 | 0,778 | 16,60 |
| Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °С}$ | | | | | | |
| 200 Вт/м ² | 0,590 | 1,960 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 0,958 | 0,828 | 19,70 |
| 400 Вт/м ² | 0,610 | 3,920 | | 1,981 | 0,828 | 20,30 |
| 600 Вт/м ² | 0,620 | 5,880 | | 3,028 | 0,831 | 20,70 |
| 800 Вт/м ² | 0,625 | 7,840 | | 4,091 | 0,835 | 21,00 |
| 1000 Вт/м ² | 0,630 | 9,800 | | 5,345 | 0,837 | 21,20 |
| 1200 Вт/м ² | 0,635 | 11,760 | | 6,250 | 0,837 | 21,40 |

Таблица 3. Параметры multi-Si СЭ при изменении освещенности и температуры

| Значения внешних факторов | Параметры СЭ | | | | | |
|---|--------------|-------------|-----------------------|---------------|-------|------------|
| | $U_{oc}, В$ | $I_{ph}, А$ | $I_s, А$ | $P_{max}, Вт$ | ff | $\eta, \%$ |
| Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ | | | | | | |
| 15 °С | 0,685 | 9,154 | $1,17 \cdot 10^{-10}$ | 5,254 | 0,838 | 21,60 |
| 25 °С | 0,670 | 9,200 | $5,00 \cdot 10^{-10}$ | 5,103 | 0,828 | 21,00 |
| 50 °С | 0,625 | 9,315 | $1,29 \cdot 10^{-8}$ | 4,722 | 0,811 | 19,40 |
| 75 °С | 0,580 | 9,430 | $2,12 \cdot 10^{-7}$ | 4,333 | 0,792 | 17,80 |
| 100 °С | 0,540 | 9,545 | $2,43 \cdot 10^{-6}$ | 3,936 | 0,506 | 16,20 |
| Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °С}$ | | | | | | |
| 200 Вт/м ² | 0,625 | 1,840 | $5,00 \cdot 10^{-10}$ | 0,941 | 0,818 | 19,30 |
| 400 Вт/м ² | 0,645 | 3,680 | | 1,950 | 0,822 | 20,00 |
| 600 Вт/м ² | 0,655 | 5,520 | | 2,986 | 0,826 | 20,40 |
| 800 Вт/м ² | 0,665 | 7,360 | | 4,038 | 0,825 | 20,70 |
| 1000 Вт/м ² | 0,670 | 9,200 | | 5,103 | 0,828 | 21,00 |
| 1200 Вт/м ² | 0,675 | 11,040 | | 6,178 | 0,829 | 25,40 |

и ГОСТ Р МЭК 60904-3—2013 [9, 10], регламентирующих способы испытания фотоэлектрических модулей.

Результаты исследований для каждого материала представлены в табл. 2–5.

Анализ результатов проведенных расчетов [8] был визуализирован в виде вольтамперных характеристик (ВАХ), представленных на рис. 1.

Проведенный сравнительный анализ четырех типов солнечных элементов выявил существен-

ную зависимость их энергоэффективности от температурных условий и уровня освещенности. Наибольшее влияние на рабочие параметры солнечных фотоэлементов оказывает повышение температуры, приводящее к значительной деградации характеристик всех исследуемых материалов.

Среди рассматриваемых фотоэлектрических преобразователей наименее устойчивым к температурным воздействиям оказался поликристал-

Таблица 4. Параметры CuInSe₂ СЭ при изменении освещенности и температуры

| Значения внешних факторов | Параметры СЭ | | | | | |
|---|--------------|--------------|-----------------------|----------------|-------|------------|
| | U_{oc} , В | I_{ph} , А | I_s , А | P_{max} , Вт | ff | η , % |
| Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ | | | | | | |
| 15°C | 0,890 | 7,547 | $6,63 \cdot 10^{-11}$ | 5,607 | 0,835 | 23,00 |
| 25°C | 0,880 | 7,600 | $2,00 \cdot 10^{-10}$ | 5,555 | 0,831 | 22,80 |
| 50°C | 0,855 | 7,733 | $2,38 \cdot 10^{-9}$ | 5,419 | 0,820 | 22,30 |
| 75°C | 0,835 | 7,866 | $2,02 \cdot 10^{-8}$ | 5,275 | 0,803 | 21,70 |
| 100°C | 0,810 | 8,000 | $1,30 \cdot 10^{-7}$ | 5,122 | 0,791 | 21,00 |
| Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °C}$ | | | | | | |
| 200 Вт/м ² | 0,820 | 1,520 | $2,00 \cdot 10^{-12}$ | 1,027 | 0,824 | 21,10 |
| 400 Вт/м ² | 0,845 | 3,040 | | 2,126 | 0,828 | 21,80 |
| 600 Вт/м ² | 0,860 | 4,560 | | 3,253 | 0,829 | 22,30 |
| 800 Вт/м ² | 0,870 | 6,080 | | 4,397 | 0,831 | 22,60 |
| 1000 Вт/м ² | 0,880 | 7,600 | | 5,555 | 0,831 | 22,80 |
| 1200 Вт/м ² | 0,885 | 9,120 | | 6,723 | 0,833 | 27,60 |

Таблица 5. Параметры SiGS СЭ при изменении освещенности и температуры

| Значения внешних факторов | Параметры СЭ | | | | | |
|---|--------------|--------------|-----------------------|----------------|-------|------------|
| | U_{oc} , В | I_{ph} , А | I_s , А | P_{max} , Вт | ff | η , % |
| Изменение температуры при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ | | | | | | |
| 15 °C | 0,820 | 7,960 | $8,21 \cdot 10^{-11}$ | 5,452 | 0,835 | 22,40 |
| 25 °C | 0,805 | 8,000 | $3,00 \cdot 10^{-10}$ | 5,339 | 0,829 | 21,90 |
| 50 °C | 0,765 | 8,100 | $5,47 \cdot 10^{-9}$ | 5,052 | 0,815 | 20,80 |
| 75 °C | 0,730 | 8,200 | $6,68 \cdot 10^{-8}$ | 4,757 | 0,795 | 19,50 |
| 100 °C | 0,690 | 8,300 | $5,92 \cdot 10^{-7}$ | 4,456 | 0,778 | 18,30 |
| Изменение освещенности при $T = 25 \text{ °C}$ | | | | | | |
| 200 Вт/м ² | 0,750 | 1,600 | $3,00 \cdot 10^{-10}$ | 0,986 | 0,821 | 20,20 |
| 400 Вт/м ² | 0,775 | 3,200 | | 2,042 | 0,824 | 21,00 |
| 600 Вт/м ² | 0,785 | 4,800 | | 3,125 | 0,829 | 21,40 |
| 800 Вт/м ² | 0,795 | 6,400 | | 4,226 | 0,830 | 21,70 |
| 1000 Вт/м ² | 0,805 | 8,000 | | 4,339 | 0,829 | 21,90 |
| 1200 Вт/м ² | 0,810 | 9,600 | | 6,463 | 0,831 | 26,60 |

лический кремний (multi-Si), демонстрирующий снижение максимальной мощности на 25,1 % при нагреве от 15 до 100 °C. Напротив, солнечные элементы на основе селенида меди-индия (CuInSe₂) показали наилучшие результаты, сохранив 91,4 % исходной мощности в тех же условиях. Разница в энергоэффективности между этими матери-

алами при экстремальном нагреве составила 23,5 %, что свидетельствует о существенном преимуществе тонкопленочной технологии в высокотемпературных режимах эксплуатации.

Анализ зависимости исследуемых параметров от уровня освещенности выявил иную картину. При изменении интенсивности солнечного излу-

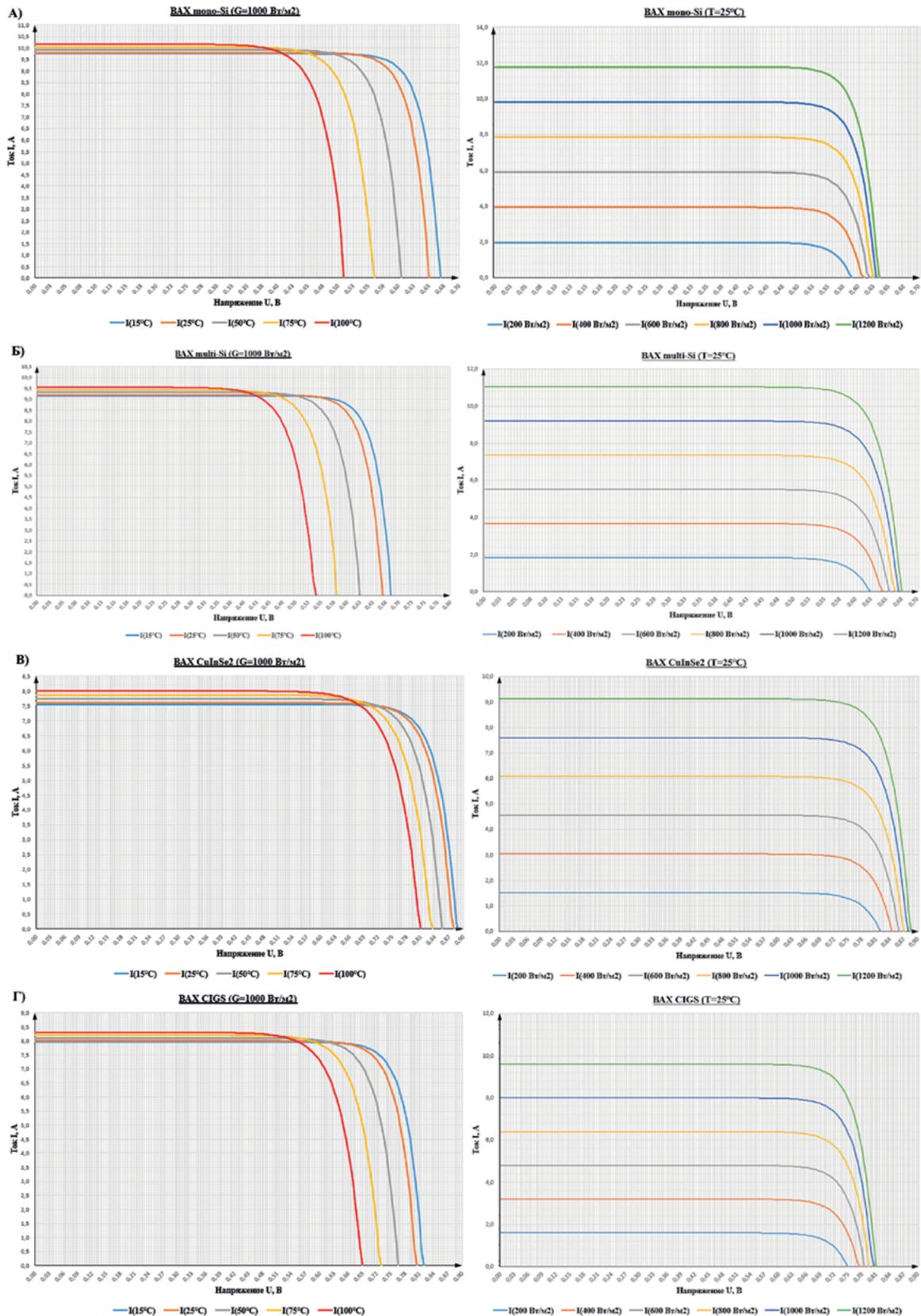


Рис. 1. ВАР солнечных элементов на основе различных материалов при варьировании температуры и освещенности: а — mono-Si; б — multi-Si

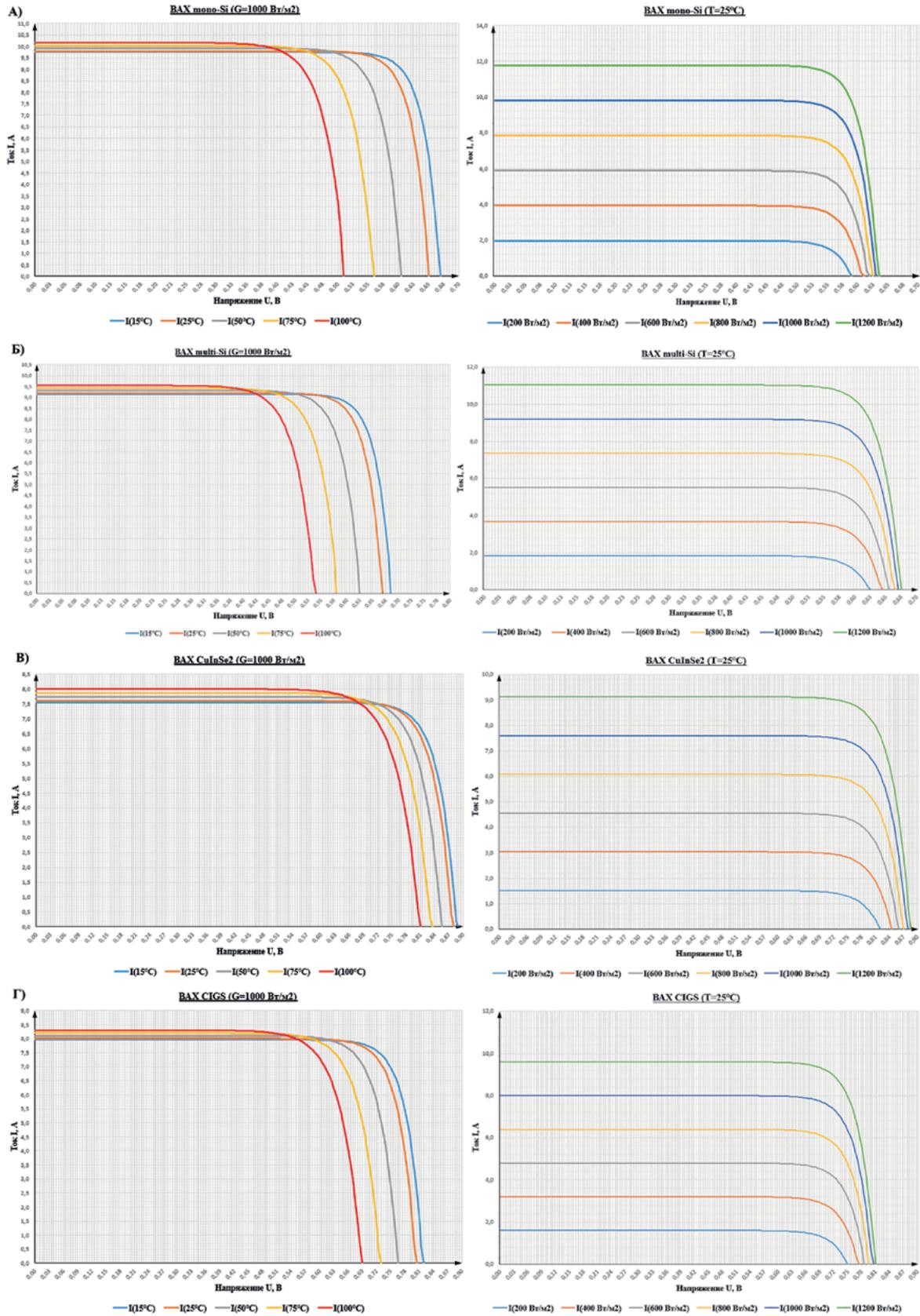


Рис. 2. BAX солнечных элементов на основе различных материалов при варьировании температуры и освещенности: ν — CuInSe₂; ε — CIGS

чения от 200 до 1200 Вт/м² разница в коэффициенте полезного действия между наименее и наиболее эффективными материалами сократилась до 6,3%. Однако даже в этих условиях CuInSe₂ сохранил лидерство, достигнув значения КПД 27,6% при максимальной освещенности, тогда как multi-Si показал результат 25,4%.

Также для оценки эффекта, связанного с энергоресурсосбережением, проведен расчет снижения расхода условного топлива при замене традиционных источников энергии на нетрадиционные — солнечные элементы. При стандартных условиях эксплуатации (освещенность 1000 Вт/м², температура 25 °С) наиболее эффективный материал — селенид меди-индия (CuInSe₂) с КПД 22,8% обеспечивает годовую выработку около 250 кВт · ч с 1 м² поверхности в средней полосе России. Такой показатель эквивалентен экономии 0,075 т у. т. на каждый квадратный метр фотоэлектрических модулей в год. Для менее эффективного поликристаллического кремния (multi-Si) с КПД 21,0% экономия составляет 0,069 т у. т./м² год. Разница в 0,006 т у. т. на квадратный метр между наиболее и наименее эффективными материалами приобретает значительные масштабы при промышленном внедрении технологий. Для солнечной электростанции мощностью 1 МВт (площадь около 6000 м²) ежегодная экономия при использовании CuInSe₂ вместо multi-Si достигает 36 т у. т.

Долгосрочный энергетический эффект становится еще более выраженным при расчете на 25-летний срок службы фотоэлектрических систем. Совокупная экономия топлива для станции мощностью 1 МВт при использовании CuInSe₂ вместо multi-Si может превысить 2000 т у. т. за весь период эксплуатации. Эти данные подтверждают целесообразность внедрения высокоэффективных тонкопленочных технологий, несмотря на их более высокую первоначальную стоимость.

Выводы

Проведенные исследования позволяют заключить, что ключевым фактором, определяющим энергоэффективность солнечных элементов, является температурная стабильность фотоэлектрических материалов. Наибольшая деградация характеристик наблюдается при повышении рабочей температуры свыше 50 °С, что особенно критично для кремниевых фотоэлементов. Среди рассмотренных материалов селенид меди-индия (CuInSe₂) продемонстрировал наилучшие эксплуатационные показатели.

Полученные результаты указывают на необходимость проведения дальнейших исследований в области повышения термостойкости фотоэлектрических преобразователей, особенно для регионов с жарким климатом. Перспективным направлением представляется изучение гибридных материалов, сочетающих преимущества тонкопленочных технологий с улучшенными температурными характеристиками. Особый интерес представляет анализ долговременной стабильности параметров солнечных элементов при циклических температурных нагрузках, характерных для реальных условий эксплуатации.

Список источников

1. Горбунова М. М. К вопросу перспектив применения возобновляемых источников энергии и технологий альтернативной энергетики / М. М. Горбунова, В. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 4(61). — С. 35–40.
2. Ильичева Ю. А. Возобновляемые источники энергии в мире и в России: учебное пособие / Ю. А. Ильичева, С. З. Жизнин, М. В. Дакалов. — М.: МГИМО-Университет, 2019. — 209 с.
3. Гременок В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский. — Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. — 222 с.

4. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. — 2004. — Т. 38. — № 8. — С. 937–948.
5. Torchynska T. V. III-V material solar cells for space application / T. V. Torchynska, G. P. Polupan // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2002. — Vol. 5. — Iss. 1. — Pp. 63–70.
6. Воронков Э. Н. Токовая неустойчивость в солнечных элементах на основе a-Si:H, возникающая после их засветки / Э. Н. Воронков // Физика и техника полупроводников. — 2001. — Т. 25. — № 6. — С. 703–706.
7. Косяченко Л. А. Проблемы эффективности фотоэлектрического преобразования в тонкопленочных солнечных элементах CdS/CdTe / Л. А. Косяченко // Физика и техника полупроводников. — 2006. — Т. 40. — № 6. — С. 730–746.
8. Юрченко А. В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов / А. В. Юрченко, А. В. Волгин, А. В. Козлов // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 314. — № 4. — С. 142–148.
9. ГОСТ Р 56983—2016 (МЭК 62108:2007). Устройства фотоэлектрические с концентраторами. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2016. — 45 с.
10. ГОСТ Р МЭК 60904-3—2013. Приборы фотоэлектрические. Часть 3: Принципы измерения характеристик фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 89 с.

Дата поступления: 08.07.2025

Решение о публикации: 11.08.2025

Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — д-р техн. наук, проф.; ripol-saragosi@mail.ru

ДУРНЕВ Иван Сергеевич — инженер; durnev.iv@mail.ru

НОВОСЕЛЬСКИЙ Игорь Юрьевич — канд. техн. наук, доц.; nttk@pgups.ru

The Impact of the Surface Temperature and Light Intensity on the Performance of Photovoltaic Cells

T. L. Ripol-Saragosi¹, I. S. Durnev², I. Yu. Novoselsky³

¹Rostov State Transport University, 2, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

²LLC "ELSICO", 132/2, of. 9, Kirovsky pr., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

³Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Ripol-Saragosi T. L., Durnev I. S., Novoselsky I. Yu. The Impact of the Surface Temperature and Light Intensity on the Performance of Photovoltaic Cells // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 802–810. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-802-810

Summary

Purpose: To present the research results describing the impact of temperature and sunlight intensity on the efficiency of solar photovoltaic cells of various types. To compare the characteristics of silicon and thin-film photovoltaic materials and to identify the most resistant materials for the photovoltaic cells. To analyse their feasibility in various climatic conditions. To assess the energy efficiency of solar photovoltaics made of silicon and thin-film materials of different types. A new method has been tested for the calculation of

voltage characteristics (WAC), the level of influence of solar element surface temperature (SE) and the sunlight intensity, as well as the values of serial (R_s) and parallel (R_{sh}) resistances associated with losses and leakage of currents. **Methods:** Methods of comparative analysis and graphical visualization were used. They helped to make conclusions and recommendations, as well as justify the choice of materials for manufacturing solar cells based on the “energy efficiency” indicator. **Practical significance:** The results of the presented studies make it possible to select photovoltaic cell materials when using unconventional solar energy instead of traditional when providing electrical power to certain facilities including railway facilities, which makes it possible to implement the principle of energy conservation at any facility for the implementation of the results obtained.

Keywords: Energy efficiency, solar cells, photovoltaic materials, temperature stability, sunlight, efficiency.

References

- Gorbunova M. M., Finochenko V. A. K voprosu perspektiv primeneniya vozobnovlyаемых источников энергии i tekhnologii al'ternativnoy energetiki [On the issue of prospects for the use of renewable energy sources and alternative energy technologies]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University]. 2022, Iss. 4(61), pp. 35–40. (In Russian)
- Il'icheva Yu. A., Zhiznin S. Z., Dakalov M. V. *Vozobnovlyаемые источники энергии v mire i v Rossii: uchebnoe posobie* [Renewable energy sources in the world and in Russia: textbook]. Moscow: MGIMO-University Publ., 2019. 209 p. (In Russian)
- Gremenok V. F., Tivanov M. S., Zaleskiy V. B. *Solnechnye elementy na osnove poluprovodnikovykh materialov* [Solar cells based on semiconductor materials]. Minsk: Publishing Center of BSU, 2007. 222 p. (In Russian)
- Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyantsev V. D. Tendentsii i perspektivy razvitiya solnechnoy fotogeneratsii [Trends and prospects for the development of solar photovoltaics]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors]. 2004, vol. 38, Iss. 8, pp. 937–948. (In Russian)
- Torchynska T. V., Polupan G. P. III-V material solar cells for space application. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2002, vol. 5, Iss. 1, pp. 63–70.
- Voronkov E. N. Tokovaya neustoychivost' v solnechnykh elementakh na osnove a-Si:H, voznikayushchaya posle ikh zasvetki [Current instability in a-Si:H solar cells arising after their illumination]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors]. 2001, vol. 25, Iss. 6, pp. 703–706. (In Russian)
- Kosyachenko L. A. Problemy effektivnosti fotoelektricheskogo preobrazovaniya v tonkoplennochnykh solnechnykh elementakh CdS/CdTe [Problems of efficiency of photoelectric conversion in thin-film CdS/CdTe solar cells]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors]. 2006, vol. 40, Iss. 6, pp. 730–746. (In Russian)
- Yurchenko A. V., Volgin A. V., Kozlov A. V. Statisticheskaya model' kremniyevykh solnechnykh batarey, rabotayushchikh pod vozdeystviem prirodnykh i apparatnykh faktorov [Statistical model of silicon solar panels operating under the influence of natural and hardware factors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University]. 2009, vol. 314, Iss. 4, pp. 142–148. (In Russian)
- GOST R 56983—2016 (IEC 62108:2007). *Ustroystva fotoelektricheskies s kontsentratorami. Metody ispytaniy* [Photovoltaic devices with concentrators. Testing methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 45 p. (In Russian)
- GOST R MEK 60904-3—2013. *Pribory fotoelektricheskies. Chast' 3: Printsipy izmereniya kharakteristik fotoelektricheskikh priborov s uchetom standartnoy spektral'noy plotnosti energeticheskoy osveshchennosti nazemnogo solnechnogo izlucheniya* [GOST R IEC 60904-3—2013. Photovoltaic devices. Part 3: Principles of measurement of photovoltaic device characteristics taking into account the standard spectral density of irradiance of terrestrial solar radiation]. Moscow: Standartinform Publ., 2014, 89 p.

Received: July 08, 2025

Accepted: August 11, 2025

Author's information:

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering, Professor; ripol-saragosi@mail.ru

Ivan S. DURNEV — Engineer; durnev.iv@mail.ru;

Igor Yu. NOVOSELSKY — PhD in Engineering,

Associate Professor; nttk@pgups.ru

УДК 691.32

Повышение достоверности результатов контроля прочности бетона при сжатии

Д. А. Черепанова, А. П. Лейкин

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

Для цитирования: Черепанова Д. А., Лейкин А. П. Повышение достоверности результатов контроля прочности бетона при сжатии // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 811–822. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-811-822

Аннотация

Цель: Рассмотреть факторы, оказывающие влияние на однородность прочности бетона при сжатии в конструкции. Определить, оказывают ли правила системы контроля влияние на значение неоднородности прочности. Установить степень влияния на результат места отбора образца из конструкции, связь направления разрушения/испытания образца относительно линии формования (поперек/вдоль) с искажением результата испытания разрушающимися и неразрушающимися методами контроля. **Методы:** Проведен анализ нормативной документации в области контроля качества бетона в контексте всего жизненного цикла зданий и сооружений; изготовлены образцы бетона разной формы (кубы и призмы) и размера из монолитного образца бетона — призмы с соотношением сторон 1:4; определена прочность при сжатии указанных образцов методами неразрушающего контроля по ударному импульсу и скорости прохождения ультразвука в разных направлениях, а также методом разрушающего контроля (по ГОСТ 22690—2015, ГОСТ 10180—2012, ГОСТ 17624—2021). Оценка прочности осуществлялась в соответствии с ГОСТ 18105—2018. **Результаты:** Установлено, что в рамках действующей системы контроля предусмотрено большое количество варьируемых параметров, которые ведут к разному уровню достоверности выходной информации о прочности бетона при сжатии в конструкции. Экспериментально подтверждено, что на результат оценки прочности при сжатии, полученный разными способами контроля, по-разному оказывает влияние направление линии испытания (относительно линии формования): при разрушающем контроле и контроле по ударному импульсу прочность ниже при испытании вдоль линии формования; при ультразвуковом контроле направление испытания не оказывает влияние на результат. Испытания показали, что прочность бетона в центральной части монолита ниже прочности по краям (подтверждено двумя видами контроля). Подтверждено снижение скорости ультразвука в бетоне с сохранением однородности результатов при базе прозвучивания менее 100 мм. **Практическая значимость:** Проведенные исследования являются основой для эффективного проектирования контроля прочности бетона: установленные связи метода контроля, направления испытания, формы и размера образцов для испытания и достоверности получаемой измерительной информации позволяют снизить количество отказов конструкций и повысить эффективность использования потенциала прочности бетона.

Ключевые слова: Бетон, прочность при сжатии, контроль качества, неразрушающие методы, разрушающий контроль, ударный импульс, скорость ультразвука, достоверность, неоднородность, коэффициент вариации.

Введение

Основы контроля качества бетона, заложенные в 50–60-х гг. прошлого века, на сегодняшний день не позволяют обеспечить безотказность бетонных и железобетонных конструкций и эффективно использовать потенциал материала [1]. Это вызвано синергетическим влиянием двух факторов: неоднородности прочности бетона в конструкции и невозможности с достаточной достоверностью судить о ее уровне в течение всего жизненного цикла зданий и сооружений, что, в свою очередь, не позволяет своевременно обнаружить опасные локальные выбросы прочности бетона [2–7]. Соответственно, повышение достоверности результатов контроля прочности бетона при сжатии способно решить обозначенную проблему.

Неоднородность прочности бетона при сжатии является следствием неоднородности его структуры, которая образуется из-за воздействия на бетон ряда технологических факторов при изготовлении и строительстве, условиях транспортировки, твердения и эксплуатации. В вопросе однородности бетона на сегодняшний день удалось однозначно прийти лишь к тому, что «бетон исключительно однороден в своей неоднородности» [8], однако единая закономерность распределения неоднородности бетона в конструкции на сегодняшний день не установлена. Таким образом, эффективность системы контроля зависит от своевременности обнаружения и исключения негативного влияния факторов, снижающих достоверность результатов контроля.

С целью повышения достоверности результатов контроля для обеспечения возможности своевременного реагирования на наличие «бракованного» бетона на любом из этапов жизненного цикла здания/сооружения в рамках исследования определена степень влияния на результат контроля неоднородности прочности бетона (места отбора при испытании образца, отобранного из

конструкции); установлена связь направления линии нагружения образца относительно линии формования (поперек/вдоль) с искажением результата испытания разрушающими и неразрушающими методами контроля.

Методы

В рамках теоретических исследований для выявления слабых мест в системе контроля, приводящих к несвоевременному обнаружению «брака» бетона, в связке рассмотрены все правила и методы, закрепленные в действующих нормативно-правовых документах, документах по стандартизации в части контроля прочности классического тяжелого бетона [9–17].

В рамках экспериментальных исследований бетонная призма возраста, значительно превышающего проектный, с соотношением сторон 1:4 ($100 \times 100 \times 400$ мм), изготовленная с использованием стандартной разборной формы (рис. 1, а), была распилена на образцы — кубы и призмы разного размера и соотношения сторон (рис. 1, б–г). Схема расположения образцов после распила в исходной монолитной балке представлена на рис. 2. Данные о количестве, форме и размерах всех образцов представлены в табл. 1.

Поверхность образцов после распила была зашлифована, исключены отклонения по геометрии до установленных в нормативной документации значений. Для каждого образца были определены масса, геометрические размеры, рассчитан объем, площадь нагружаемого сечения, плотность. Средняя плотность — 2422 кг/м^3 , коэффициент вариации плотности составил 3,88 %. Также на образцах было обозначено направление формования.

Определение прочности осуществлялось в соответствии с ГОСТ 10180—2012 при разрушающем контроле, по ГОСТ 17624—2021 — при ультразвуковом контроле, механическим методом неразрушающего контроля — по ГОСТ 22690—

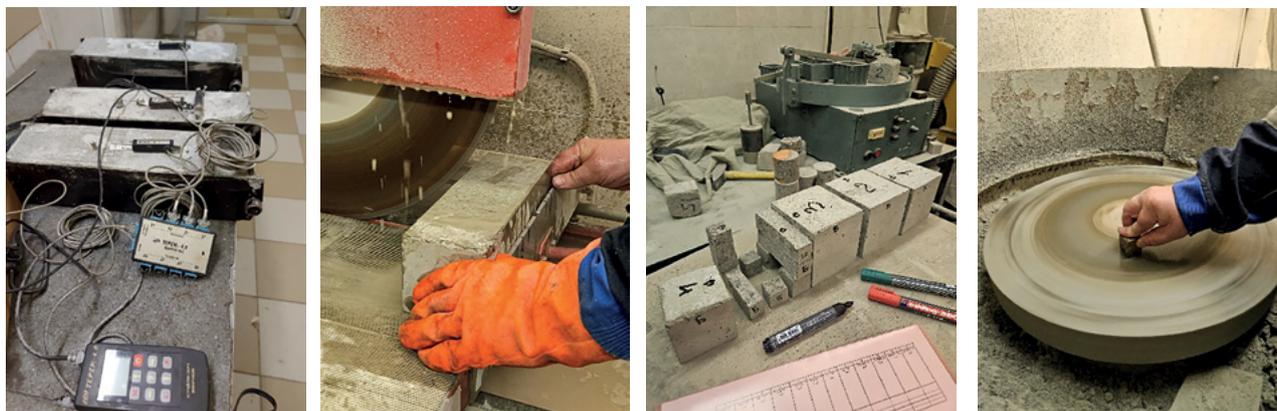


Рис. 1. Подготовка образцов для испытания:
 а — форма для изготовления образца-призмы; б — распил монолитной призмы;
 в — образцы, полученные после распила; г — шлифовка поверхности для испытания
 (автор фото: Д. А. Черепанова)

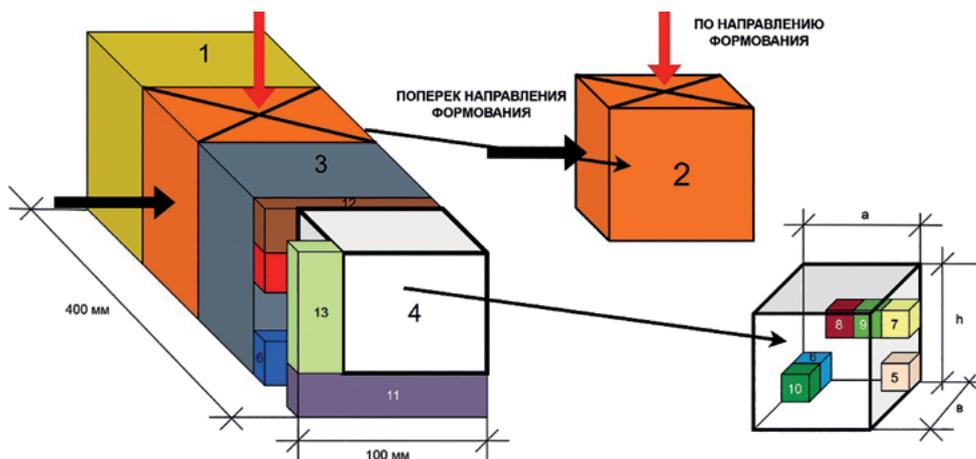


Рис. 2. Схема расположения образцов после распила в исходной монолитной балке

Таблица 1. Основные характеристики образцов для испытания

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----------------------|----------|-------|-------|---------|---------|-------|-----------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| Форма | Куб «10» | | | Куб «7» | Куб «3» | | Куб «2,5» | | | Призма «2,5» | | | |
| Размер | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:1» | «1:4» | «1:4» | «1:3» |
| a, см | 9,6 | 9,9 | 9,4 | 6,6 | 3,1 | 2,9 | 2,5 | 2,5 | 3 | 2,6 | 2,1 | 2,7 | 2,5 |
| b, см | 9,7 | 10 | 10 | 7,1 | 3,2 | 3,2 | 2,5 | 2,5 | 2,7 | 2,6 | 2,9 | 2,5 | 2,4 |
| h, см | 10 | 9,9 | 10,1 | 6,4 | 3,1 | 3,6 | 2,6 | 2,6 | 2,5 | 2,6 | 9,9 | 9,9 | 6,9 |
| ρ, кг/м ³ | 2354 | 2341 | 2361 | 2301 | 2536 | 2395 | 2462 | 2585 | 2370 | 2503 | 2355 | 2544 | 2319 |

2015. Оценка прочности осуществлялась в соответствии с ГОСТ 18105—2018.

Неразрушающий контроль прочности был реализован с помощью приборов, работа которых основана на методах оценки ударного импульса и скорости прохождения ультразвука (рис. 3)

При ультразвуковом контроле каждый образец был испытан по и против направления формирования способом сквозного прозвучивания. Количество измерений — 3 в каждом направлении. Испытание методом ударного импульса осуществлялось в направлении, противополож-

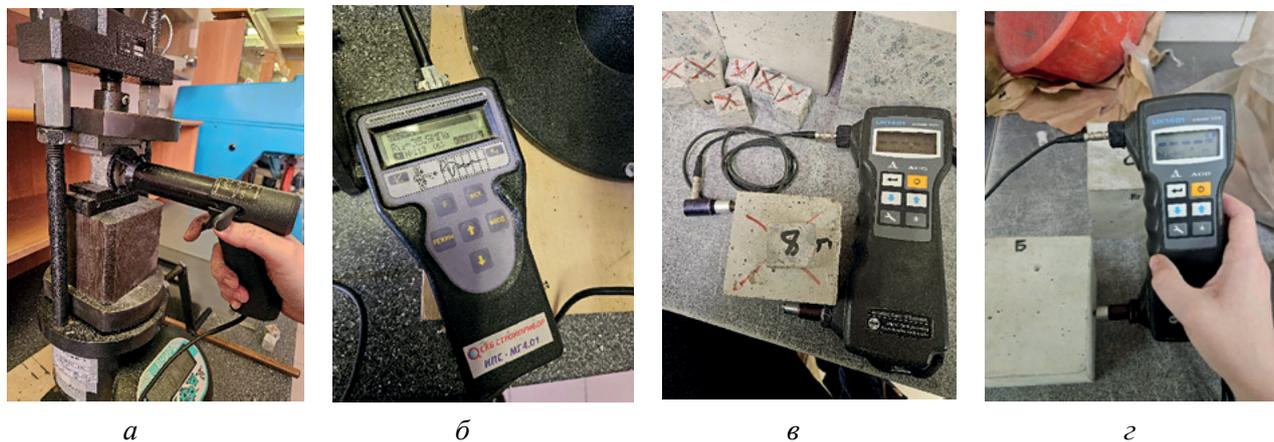


Рис. 3. Определение прочности неразрушающими методами контроля:
а, б — контроль методом ударного импульса с помощью склерометра (измерителя прочности материалов) ИПС МГ4.01; *в, г* — ультразвуковой контроль с помощью ультразвукового тестера УК1401 (автор фото: Д. А. Черепанова)



Рис. 4. Разрушение образцов:
а — удовлетворительная схема разрушения образцов-кубов при сжатии, закрепленная в нормативной документации; *б* — образец № 1 после испытания на сжатие поперек линии формования; *в, г* — образец № 2 после испытания на сжатие по линии формования (автор фото: Д. А. Черепанова)

ном направлению испытания при разрушающем контроле. Среднее определялось на основании 15 значений.

Все образцы-кубы, испытанные как вдоль линии формования, так и поперек, разрушились по удовлетворительной схеме (рис. 4).

Для перевода призмной прочности в кубиковую использовалась известная зависимость при соотношении стороны сечения призмы к высоте (a/h), равном 1:4 (1) [18]:

$$R_{\text{пр}} = 0,75 \cdot R_{\text{куб}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{пр}}$ — прочность образца-призмы квадратного сечения;

$R_{\text{куб}}$ — прочность образца-куба соответствующего сечения.

При переводе прочности образцов-кубов с размером граней 7 и 10 см к размеру стандартного образца 15 см использовались переводные коэффициенты, закрепленные в нормативной документации [13], выдержка из которого представлена на рис. 5.

| Форма и размеры образца, мм | Масштабные коэффициенты при испытании | | | | |
|---|--|---|------------------------|---|------------------------------|
| | на сжатие всех видов бетонов, кроме ячеистого α | на растяжение при раскалывании γ | | на растяжение при изгибе тяжелого бетона δ | на осевое растяжение β |
| | | тяжелого бетона | мелкозернистого бетона | | |
| Куб (ребро) или квадратная призма (сторона поперечного сечения) | | | | | |
| 70 | 0,85 | 0,78 | 0,87 | 0,86 | 0,85 |
| 100 | 0,95 | 0,88 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| 150 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 200 | 1,05 | 1,10 | 1,05 | 1,15 | 1,08 |

Рис. 5. Масштабные коэффициенты для приведения прочности испытанных образцов к прочности стандартных

Таблица 2. Прочность при сжатии по результатам разрушающего контроля

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------------------------|----------|------|------|---------|---------|------|-----------|------|------|--------------|------|------|------|
| Форма | Куб «10» | | | Куб «7» | Куб «3» | | Куб «2,5» | | | Призма «2,5» | | | |
| Прочность, R , МПа | 69,8 | 43,2 | 66,5 | 65,9 | 19,2 | 50,4 | 33,0 | 58,9 | 29,1 | 71,3 | 47,0 | 51,9 | 51,3 |
| Направление разрушения* | → | ↓ | → | → | ↓ | → | ↓ | → | ↓ | → | → | → | ↓ |

*«↓» — по направлению формования; «→» — поперек направления формования.

Результаты

Основными варьируемыми параметрами при испытании бетона является метод испытания, форма, размер образцов для испытания и их количество. Арбитражным считается разрушающий контроль. Результаты разрушающего контроля прочности описанных ранее образцов представлены в табл. 2.

Обязательным для поддержания требуемого уровня обеспеченности является оценка прочности бетона с учетом фактической однородности. Для определения и учета однородности прочности бетона применяются 4 схемы: А, Б, В, Г. Представленные данные еще раз демонстрируют, что бетон «однороден в своей неоднородности»: коэффициент вариации прочности по разным группам образцов колеблется около значения 8,65 % с отклонением в 0,15 % в большую и меньшую стороны. То есть неоднородность бетона сохраняется при разном количестве, размере, форме образцов, направлении разрушения на одинаковом уровне.

Наибольший коэффициент вариации прочности получен на образцах-кубах «2,5». Это свя-

зано, в первую очередь, с масштабным фактором: на результат рассчитываемой прочности гораздо сильнее влияет точность измерения геометрических размеров для расчета площади нагружаемого сечения. В случае, если используются образцы небольшого размера, требуется повышать точность измерения геометрических размеров для получения корректных результатов.

Важным результатом является демонстрация того факта, что **прочность бетона при разрушающем контроле значительно отличается в зависимости от направления испытания относительно линии формования**: по линии или поперек. Для прочности в переводе на стандартные образцы-кубы «15» эта разница составляет по результатам проведенных испытаний 33,7 %: прочность бетона при нагружении по линии формования (именно так работает бетон в монолитных вертикальных конструкциях) ниже на 33,7 %. Аналогичный результат получен и на образцах-кубах меньшего размера («2,5»). При этом стандартные специально изготовленные образцы-кубы (например, при контроле на заводе или при контроле по образцам, твердевшим в условиях

Таблица 3. Результаты разрушающего контроля прочности при сжатии с разбивкой по группам образцов

| Образцы, направление испытания | Кубы «10», «7», → | | | Куб «10», ↓ | Кубы «2,5», → | | Призма «2,5», ¼, → | | Кубы «2,5», ↓ | |
|---|----------------------|------|------|----------------|------------------|------|-----------------------|------|------------------|------|
| | 1 | 3 | 4 | 2 | 8 | 10 | 11 | 12 | 7 | 9 |
| Прочность в переводе на стандартный образец-куб «15»/ образец-куб «2,5» (для призмы), R , МПа | 66,3 | 63,2 | 56,0 | 41,0 | 58,9 | 71,3 | 62,6 | 69,1 | 33,0 | 21,9 |
| Средняя прочность в группе, R_{cp} , МПа | 61,8 | | | 41,0 | 65,1 | | 65,9 | | 31,0 | |
| Отклонение прочности, $R \downarrow$ относительно $R \rightarrow$, % | – | | | –33,7 | – | | – | | –52,3 | |
| Коэффициент вариации прочности V_m , % | 8,5 | | | – | 13,5 | | 7,0 | | 8,7 | |
| | | | | | 8,8 | | | | | |
| K_T^* | 1,11 | | | 1,28/1,11 | 1,33 | | 1,08 | | 1,11 | |
| | | | | | 1,11 | | | | | |
| Обеспеченная с вероятностью 0,95 прочность, МПа | 59,7 | | | 33,7/37,0 | | | – | | | |
| Класс по прочности при сжатии | B55 | | | B30/B35 | | | | | | |

*Коэффициент K_T по схеме В/Г для расчета фактического класса по прочности.

Таблица 4. Результаты скорости ультразвука

| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|----------|------|------|---------|---------|------|-----------|------|------|------|--------------|------|------|
| Форма | Куб «10» | | | Куб «7» | Куб «3» | | Куб «2,5» | | | | Призма «2,5» | | |
| $V_{y3 \rightarrow}^*$, м/с | 2669 | 3049 | 2756 | 2892 | 1970 | 1993 | 1659 | 1437 | 1603 | 1526 | 3371 | 3486 | 2083 |
| $V_{y3 \downarrow}^{**}$, м/с | 2756 | 2979 | 2850 | 3009 | 1787 | 1782 | 1632 | 1689 | 1475 | 1699 | 2332 | 2658 | 1698 |
| $\Delta V_{y3 \downarrow} \text{ к } V_{y3 \rightarrow}$, %*** | 3 | –2 | 3 | 4 | –9 | –11 | –2 | 18 | –8 | 11 | –31 | –24 | –18 |

* $V_{y3 \rightarrow}$ — скорость ультразвука в образце при прозвучивании поперек направления линии формования;

** $V_{y3 \downarrow}$ — скорость ультразвука в образце при прозвучивании по направлению линии формования;

*** $\Delta V_{y3 \downarrow} \text{ к } V_{y3 \rightarrow}$ — отклонение скорости ультразвука по линии формования относительно скорости ультразвука поперек линии формования в процентах.

строительной площадки) при испытании разворачивают на боковую грань, то есть испытание происходит поперек направления линии формования, а именно по направлению, при котором прочность бетона выше. В случае, если не принимать в расчет направление испытания и полученные результаты по каждому направлению рассматривать отдельно, то получится, что оценить прочность одного и того же бетона из достаточно небольшого (в сравнении с монолитными конструкциями зданий и сооружений) монолитного образца можно и как класс B55, и как B30. Эти результаты одновременно демонстрируют как низкую эффективность использования потенциала бетона, так и то, почему «хороший» (соответ-

ствующий требованиям по результатам контроля) бетон приводит к отказам в конструкциях.

Образцы 8 и 9 (кубики «2,5») изначально находились в центральной части балки, образцы 7 и 10 (кубики «2,5») — по краям (рис. 2). Они были испытаны в разных направлениях (табл. 2, 3). В обоих случаях прочность образцов центральной части оказалась ниже прочности образцов, находившихся с края. Однако в связи с установленным фактом снижения прочности при испытании по направлению формования на всех других образцах, испытанных по линии формования, судить о конкретном значении доли снижения прочности по этим образцам не представляется возможным без проведения дополнительных

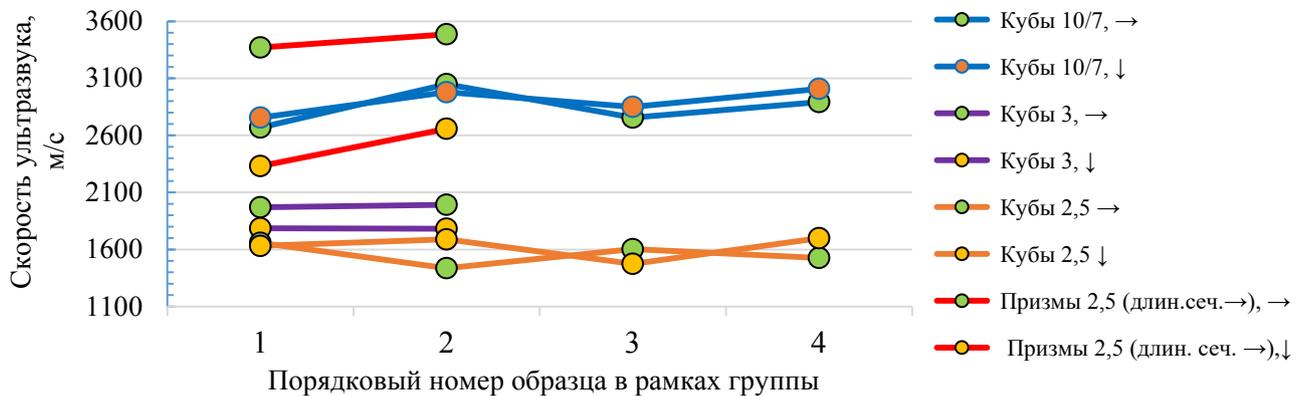


Рис. 6. Скорость ультразвука в образцах по группам в разном направлении

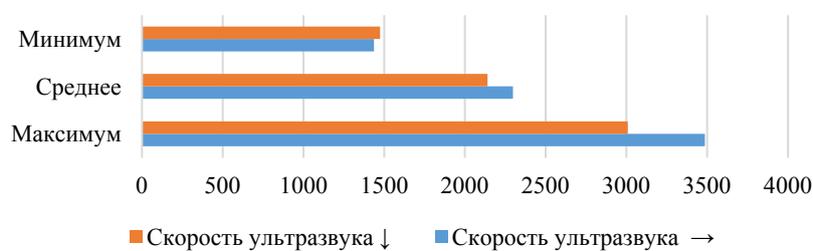


Рис. 7. Данные о результатах максимальной, средней и минимальной скорости по всем образцам в разных направлениях испытания

испытаний (сравнивались одинаковые образцы 7 и 9, испытанные в одном направлении). Что касается образцов 8 и 10, испытанных поперек направления линии формования, то прочность образца центральной части ниже на 18 % (что значительно превышает определенный коэффициент вариации).

Неразрушающие методы контроля имеют более низкую точность, однако позволяют, как предполагается, обеспечить сплошной контроль всех конструкций [19]. Результаты ультразвукового контроля представлены в табл. 4.

Согласно правилам, определенным в нормативной документации, база для сквозного прозвучивания должна составлять не менее 100 мм (допустимо не менее 70 мм для мелкозернистых) с учетом существующих ограничений самого прибора. Поэтому «эталонными» приняты данные, полученные по результатам испытания кубов «10» и «7». Коэффициент вариации зна-

чений скорости ультразвука по этим образцам составляет 4 %.

В нормативной документации установлено, что «измерения следует проводить на поверхности, занимающей при изготовлении положение относительно формы и направления формования, аналогичное положению контролируемой поверхности изделия». При этом полученные на «эталонных образцах» (кубах «10» и «7») данные демонстрируют, что скорость ультразвука не имеет закономерности по ее уменьшению при прозвучивании вдоль линии формования относительно скорости, полученной путем измерения поперек линии формования в отличие от разрушающего контроля. Она колеблется как в меньшую, так и в большую сторону (табл. 4, рис. 6)

Данные о параметрах скорости ультразвука во всех остальных образцах имеют аналогичную динамику (рис. 7).

Таблица 5. Результаты неразрушающего контроля прочности методом ударного импульса со сравнением результатов разрушающего контроля

| Номер образца | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|-----------|------|------|------|
| Форма, размер | Куб «2,5» | | | |
| Направление испытания* | → | ↓ | → | ↓ |
| Средняя прочность по шкале прибора, МПа | 70,4 | 39,6 | 59,9 | 51,7 |
| Коэффициент вариации прочности, % | 9,1 | 11,3 | 11,4 | 13,1 |
| Прочность при разрушающем контроле в перпендикулярном направлении, R , МПа | 33,0 | 58,9 | 21,9 | 71,3 |

*«↓» — по направлению формования; «→» — поперек направления формования.

С уменьшением размера образцов уменьшается и скорость ультразвука. Данная зависимость известна. Это связано с рядом факторов: на результат начинают оказывать влияние поверхностные эффекты и неоднородность бетона. В небольших образцах (таких как кубы «3» и «2,5») доля поверхности по отношению к объему значительно выше, что приводит к искажению результатов измерений. Также такие образцы часто имеют больше дефектов на поверхности, таких как микротрещины или поры, которые в том числе являются результатом механической обработки и могут замедлять распространение ультразвука, а неоднородность бетона в больших образцах сглаживается, в то время как в маленьких образцах оказывает более существенное влияние на скорость ультразвука.

Рассмотрение результатов по группам разных размеров это подтверждает (образцов 1–4; 5–6; 7–10): каждая последующая группа имеет меньшую скорость ультразвука. Уменьшение скорости ультразвука из-за уменьшения базы прозвучивания наглядно видно на примере образцов-призм 11 и 12, которые были выпилены в одном направлении. При прозвучивании вдоль меньшего размера скорость ниже на 27 % (рис. 6).

Однако нельзя не отметить, что образец-призма 13, который имеет другое направление выпиления по сравнению с образцами 11 и 12, имеет аналогичную динамику (хоть и в меньшей степени) по снижению скорости при прозвучивании вдоль линии формования, несмотря на то что данные по

меньшему значению скорости ультразвука получены на базе 690 мм, а большие — на базе 240 мм. С учетом изложенного целесообразно проведение дополнительных испытаний на образцах-призмах для установления конкретных закономерностей или их отсутствия в связи с определением влияния направления формования бетона и направления испытания при ультразвуковом контроле.

Кроме того, анализ результатов контроля образцов 7–10 (кубиков «2,5» и 11–12 (призм «2,5»)) показывает, что, несмотря на одинаковую базу прозвучивания, скорость ультразвука в призмах на 35 % выше скорости в образцах-кубах (табл. 4). Требуется дополнительные испытания для установления влияния формы образца на скорость ультразвука, так как если полученные данные подтверждаются на большей выборке, то на данный момент это будет еще одним не учитываемым в рамках системы контроля фактором, влияющим на достоверность результата контроля прочности бетона.

Нельзя не отметить, что на результат ультразвукового контроля оказывает значительное влияние компетентность лица, его осуществляющего, так как результат напрямую зависит от качества акустического контакта прибора и поверхности испытываемого образца, которое обеспечивается лицом, осуществляющим испытание.

Результаты контроля методом ударного импульса сведены в табл. 5.

Представленные данные демонстрируют, что на результат неразрушающего контроля прочности методом ударного импульса, как и результат

разрушающего контроля, влияет направление испытания. Средняя прочность образцов, испытанных по направлению формования, ниже относительно образцов, испытанных в перпендикулярном направлении, на 30 %. О корректности представленных данных (несмотря на небольшой объем выборки) косвенно свидетельствует рассмотрение данных в контексте результатов разрушающего контроля прочности этих же образцов (табл. 5, последняя строка).

Несмотря на то, что испытания проводились в разных направлениях, динамика соотношения прочности относительно друг друга в парах, испытанных в одном направлении, одинакова и при разрушающем, и при неразрушающем контроле: $R_7 > R_9$; $R_{10} > R_8$.

Отдельно стоит отметить, что в рамках всех методов контроля коэффициент вариации прочности или ее косвенных признаков (скорости ультразвука, ударного импульса) не превышает 13% в группах образцов с одинаковыми вводными данными испытания. Однако возможность использования недостоверных данных для построения градуировочной кривой является значительной с учетом представленных выше результатов испытаний и анализа.

Выводы

Значительную долю при оценке неоднородности прочности бетона при сжатии дают факторы контроля (различие форм, размеров образцов, направления испытания, места отбора проб), то есть исключение их влияния перспективно в целях повышения использования потенциала бетона и снижения вероятности отказов конструкций из него.

На результат, полученный разными способами контроля, по-разному оказывает влияние направление линии формования относительно линии испытания. Проектировать контроль требуется таким образом, чтобы образцы для кон-

троля отражали направление работы бетона в монолитной конструкции относительно линии формования. В случае использования стандартных образцов-кубов при определении прочности и установлении градуировочных зависимостей по ним для неразрушающих методов контроля требуется испытывать образцы по линии формования для получения достоверных результатов, отражающих в большей степени прочность бетона в конструкции. При этом в случае, если направление неразрушающего контроля будет иным, то градуировочную зависимость следует строить с учетом поправочного коэффициента, отражающего отношение прочности конкретного бетона по направлению формования к прочности в противоположном направлении.

Список источников

1. Статистика по авариям/обрушениям // Нострой. — URL: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (дата обращения: 25.07.2025).
2. Карапетов Э. С. Прогнозирование срока службы железобетонных мостов с учетом внешних факторов и особенностей бетона защитного слоя / Э. С. Карапетов, Д. А. Шестовицкий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2014. — № 2(39). — С. 17–29.
3. Казанская Л. Ф. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов / Л. Ф. Казанская, В. А. Майер, Э. С. Сибгатуллин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — № 4. — С. 931–943.
4. Беленцов Ю. А. Повышение надежности возводимых конструкций за счет повышения точности метода оценки класса бетона в стандартных образцах / Ю. А. Беленцов, В. М. Комов // Вестник Петровской Академии наук и искусств. — 2019. — № 1-2(54). — С. 51–55.
5. Беленцов Ю. А. Оценка методов контроля прочности бетона по критерию надежности возводимых конструкций / Ю. А. Беленцов, А. М. Харитонов, Ю. М. Тихонов // Вестник гражданских инженеров. — 2017. — № 6(65). — С. 147–151.

6. Комов В. М. Статистический контроль качества бетонов для предотвращения «локальных выбросов» прочности в объеме материала / В. М. Комов, Ю. А. Беленцов, Д. А. Черепанова // Актуальные проблемы естественных и технических наук: сборник статей межвузовской научно-практической конференции. — СПб., 2023. — С. 234–244.
7. Беленцов Ю. А. Влияние методики контроля качества бетона по физико-механическим показателям на надежность строительных конструкций / Ю. А. Беленцов, Д. А. Черепанова // Бетон и железобетон. — 2023. — № 619(5/6). — С. 25–31.
8. Скоробогатов С. М. Руководство по расчету конструкций на основе теории катастроф / С. М. Скоробогатов. — Свердловск: Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта им. Я. М. Свердлова, 1991. — 161 с.
9. СП 48.13330.2019 «СНиП 12-01—2004. Организация строительства»: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24 декабря 2019 года № 861/пр.
10. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (Актуализированная редакция СНиП 52-01—2003) / Минстрой России. — М., 2018. — 156 с.
11. СП 70.13330.2012 (СНиП 3.03.01—87) Несущие и ограждающие конструкции / Госстрой ФАУ ФЦС. — Введ. 01.07.2013. — М., 2012. — 135 с.
12. ГОСТ 27751—2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
13. ГОСТ 10180—2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
14. ГОСТ 17624—2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
15. ГОСТ 22690—2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
16. ГОСТ 18105—2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
17. ГОСТ 31937—2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
18. Байков В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс: учебник для вузов / В. Н. Байков. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1991. — 67 с.
19. Петрова Т. М. Особенности оценки качества железобетонных конструкций транспортного строительства неразрушающими методами контроля / Т. М. Петрова, А. П. Лейкин, А. В. Полетаев, Ю. А. Сорвачева и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 1(42). — С. 46–51.

Дата поступления: 30.07.2025

Решение о публикации: 31.08.2025

Контактная информация:

ЧЕРЕПАНОВА Дария Алексеевна — ст. преподаватель, начальник отдела качества; cherepanova@pgups.ru

ЛЕЙКИН Алексей Павлович — канд. техн. наук, доц.; leikin@pgups.ru

Improving the Reliability of Test Results for Concrete Compressive Strength

D. A. Cherepanova, A. P. Leykin

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

For citation: Cherepanova D. A., Leykin A. P. Improving the Reliability of Test Results for Concrete Compressive Strength // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 811–822. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-811-822

Summary

Purpose: To consider the factors influencing the homogeneity of concrete's compressive strength in a structure. To determine whether the rules of the control system influence the value of strength heterogeneity. To establish the extent to which sample location within the structure influences the result, and the relationship between sample destruction/testing direction (across/along) relative to the moulding line and distortion of the test result by destructive and non-destructive methods. **Methods:** An analysis of regulatory documentation in the field of concrete quality control was conducted in the context of the entire life cycle of buildings and structures. Samples of concrete in different shapes and sizes (cubes and prisms) were made from a prism-shaped monolithic concrete sample with an aspect ratio of 1:4. The compressive strength of these samples was determined using non-destructive testing methods for impact pulse and ultrasound velocity in different directions, as well as by destructive testing (in accordance with the Russian standards GOST 22690-2015, GOST 10180-2012 and GOST 17624-2021). The strength of the material was assessed in accordance with the Russian standard GOST 18105-2018. **Results:** It was determined that the existing control system accommodates a multitude of variable factors, thereby resulting in divergent levels of reliability concerning the output information on the compressive strength of concrete. It has been experimentally confirmed that the compressive strength assessment results obtained by different testing methods are differently affected by the test line direction (relative to the line of molding). With destructive testing and impact pulse testing, the strength is lower when testing along the line of molding; with ultrasonic testing, the test direction does not affect the result. The findings of the tests indicated that the concrete strength in the central part of the monolith is lower than the strength at the edges (a conclusion that was corroborated by two types of testing). A decrease in the ultrasound velocity in concrete while maintaining the homogeneity of the results with a sounding base of less than 100 mm has been confirmed. **Practical significance:** The findings of the conducted studies will provide a solid foundation for the effective design of concrete strength testing. The established relationships between the testing method, test direction, shape and size of test specimens, and the reliability of the obtained measurement data will serve to reduce the number of structural failures and increase the efficiency of utilising the concrete strength potential.

Keywords: Concrete, compressive strength, quality control, non-destructive methods, destructive testing, impact pulse, ultrasound velocity, reliability, heterogeneity, variation coefficient.

References

1. Statistika po avariyam/obrusheniyam [Statistics on accidents/collapses]. *Nostroy*. Available at: https://nostroy.ru/news_files/2020/01/15/Statystika.pdf (accessed: July 25, 2025). (In Russian)
2. Karapetov E. S., Shestovitskiy D. A. Prognozirovanie sroka sluzhby zhelezobetonnykh mostov s uchetom vneshnikh faktorov i osobennostey betona zashchitnogo sloya [Prediction of the service life of reinforced concrete bridges taking into account external factors and characteristics of the protective layer concrete]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2014, Iss. 2(39), pp. 17–29. (In Russian)
3. Kazanskaya L. F., Mayer V. A., Sibgatullin E. S. Vzaimosvyaz' faktorov, opredelyayushchikh dolgovечnost' betonov [Interrelation of factors determining the durability of concretes]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024, vol. 21, Iss. 4, pp. 931–943. (In Russian)
4. Belentsov Yu. A., Komov V. M. Povyshenie nadezhnosti vozvodimykh konstruksiy za schet povysheniya tochnosti metoda otsenki klassa betona v standartnykh obraztsakh [Improving the reliability of erected structures by increasing the accuracy of the method for assessing the concrete class in standard samples]. *Vestnik Petrovskoy Akademii nauk i iskusstv* [Bulletin of the Petrovsky Academy of Sciences and Arts]. 2019, Iss. 1-2(54), pp. 51–55. (In Russian)
5. Belentsov Yu. A., Kharitonov A. M., Tikhonov Yu. M. Otsenka metodov kontrolya prochnosti betona po kriteriyu nadezhnosti vozvodimykh konstruksiy [Evaluation of methods for controlling the strength of concrete based on the criterion of reliability of erected structures]. *Vestnik*

grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2017, Iss. 6(65), pp. 147–151. (In Russian)

6. Komov V. M., Belentsov Yu. A., Cherepanova D. A. Statisticheskiy kontrol' kachestva betonov dlya predotvrashcheniya "lokal'nykh vybrosov" prochnosti v ob'eme materiala [Statistical quality control of concrete to prevent "local spikes" in strength in the bulk of the material]. *Aktual'nye problemy estestvennykh i tekhnicheskikh nauk: sbornik statey mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of natural and technical sciences: collection of articles of the interuniversity scientific-practical conference]. St. Petersburg, 2023, pp. 234–244. (In Russian)

7. Belentsov Yu. A., Cherepanova D. A. Vliyanie metodiki kontrolya kachestva betona po fiziko-mekhanicheskim pokazatelyam na nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy [The influence of the methodology for controlling the quality of concrete based on physical and mechanical indicators on the reliability of building structures]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, Iss. 619(5/6), pp. 25–31. (In Russian)

8. Skorobogatov S. M. *Rukovodstvo po raschetu konstruksiy na osnove teorii katastrof* [Guide to calculating structures based on catastrophe theory]. Sverdlovsk: Ural'skiy elektromekhanicheskiy institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta im. Ya. M. Sverdlova Publ., 1991, 161 p. (In Russian)

9. SP 48.13330.2019 "SNiP 12-01—2004. Organizatsiya stroitel'stva": utverzhen prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RF ot 24 dekabrya 2019 goda № 861/pr [SP 48.13330.2019 "SNiP 12-01—2004. Organization of Construction": approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2019 № 861/pr]. (In Russian)

10. SP 63.13330.2018. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01—2003)*. Minstroy Rossii [SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions (Updated version of SNiP 52-01-2003). Ministry of Construction of Russia]. M., 2018, 156 p. (In Russian)

11. SP 70.13330.2012 (SNiP 3.03.01—87) *Nesushchie i ograddayushchie konstruksii. Gosstroy FAU FTsS. Vved. 01.07.2013* [SP 70.13330.2012 (SNiP 3.03.01-87) Load-bearing and enclosing structures. Gosstroy FAU FTsS. Introduced 01.07.2013]. Moscow, 2012, 135 p. (In Russian)

12. GOST 27751—2014. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozheniya* [GOST 27751—2014. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions]. (In Russian)

13. GOST 10180—2012. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam* [Concretes. Methods for determining strength using control samples]. (In Russian)

14. GOST 17624—2021. *Betony. Ul'trazvukovoy metod opredeleniya prochnosti* [GOST 17624—2021. Concretes. Ultrasonic method for determining strength]. (In Russian)

15. GOST 22690—2015. *Betony. Opredelenie prochnosti mekhanicheskimi metodami nerazrushayushchego kontrolya* [GOST 22690—2015. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive testing]. (In Russian)

16. GOST 18105—2018. *Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti* [GOST 18105—2018. Concretes. Rules for monitoring and assessing strength]. (In Russian)

17. GOST 31937—2024. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya* [GOST 31937—2024. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition]. (In Russian)

18. Baykov V. N. *Zhelezobetonnye konstruksii. Obshchiy kurs: uchebnik dlya vuzov, 5-e izd., pererab. i dop.* [Reinforced concrete structures. General course: textbook for universities, 5th ed., revised and enlarged]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1991, 67 p. (In Russian)

19. Petrova T. M., Leykin A. P., Poletaev A. V., Sorvacheva Yu. A. et al. Osobennosti otsenki kachestva zhelezobetonnykh konstruksiy transportnogo stroitel'stva nerazrushayushchimi metodami kontrolya [Features of quality assessment of reinforced concrete structures of transport construction by non-destructive testing methods]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2015, Iss. 1(42), pp. 46–51. (In Russian)

Received: July 30, 2025

Accepted: August 31, 2025

Author's information:

Dariya A. CHEREPANOVA — Senior lecturer, Head of Quality Department; cherepanova@pgups.ru

Aleksey P. LEYKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; leikin@pgups.ru

УДК 656.1

Вопросы текущего состояния и дальнейшего развития средств индивидуальной мобильности

Л. А. Лосин^{1, 2}, А. А. Калинин²

¹Институт проблем региональной экономики РАН, Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Серпуховская ул., 38

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

Для цитирования: Лосин Л. А., Калинин А. А. Вопросы текущего состояния и дальнейшего развития средств индивидуальной мобильности // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 823–830. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-823-830

Аннотация

Цель: Проанализировать имеющиеся отечественные и зарубежные источники информации о частоте и качестве применения средств индивидуальной мобильности (СИМ) в городах, а также тенденции развития этого перспективного направления транспорта. **Методы:** Анализ открытых источников информации, статистических данных, данных опросов и исследований. **Результаты:** СИМ становятся все более популярными в России и мире, особенно в крупных городах. Рост продаж СИМ и количество поездок свидетельствуют о значительном распространении этого вида транспорта в Российской Федерации и за ее пределами. Существует необходимость регулирования движения СИМ и обеспечения безопасности при их использовании. Развитие рынка СИМ требует дальнейшего совершенствования законодательства. **Практическая значимость:** Результаты анализа тенденций развития рынка СИМ могут быть использованы при разработке проектов по развитию городской инфраструктуры, для решения задач управления системой передвижений, для разработки мер по обеспечению безопасности использования СИМ. Анализ примеров развития инфраструктуры СИМ может быть использован при планировании и реализации проектов в сфере микромобильности.

Ключевые слова: Транспортная система, средства индивидуальной мобильности, городская мобильность, микромобильность, транспортная инфраструктура, электросамокат, кикшеринг.

Введение

Дорожное движение в современных реалиях оказывает значительное влияние на общественную жизнь [1]. Мир стремительно меняется, и транспортная революция — яркое тому подтверждение. Мы живем в эпоху, когда технологический прогресс неустанно порождает новые способы передвижения, предлагая быстрые, удобные и экономичные решения, особенно актуальные в условиях растущих цен на топливо и затрудненного дорожного трафика.

Развитие средств индивидуальной мобильности (далее — СИМ), первоначально зародившееся в зарубежных странах, в последние годы активно распространяется в России. По мнению экспертов [2], электросамокаты будут выступать наиболее эффективным решением в условиях, когда потребители начинают отвыкать самостоятельно управлять автомобилем, предпочитая общественный транспорт или доступные по цене услуги такси.

Всего несколько лет назад электросамокаты воспринимались большинством как модная, но

все же несерьезная игрушка, аналог гироскутеров или сигвеев. Их место, казалось, было на детских площадках, а не на оживленных городских улицах. Однако к 2018 г. ситуация кардинально изменилась. Слияние нескольких ключевых факторов — потребительского спроса, инвестиционных потоков и технологического прогресса — превратило электросамокаты из нишевого продукта в заметный элемент городской инфраструктуры. Этот феноменальный взлет можно объяснить несколькими причинами:

1. Увеличение потребности в микромобильности. В мегаполисах с постоянно растущим населением и пробками на дорогах возникла острая необходимость в альтернативных способах передвижения на короткие дистанции. Электросамокат оказался идеальным решением: компактный, маневренный и относительно недорогой, он позволяет обойти пробки, быстро добраться до метро или автобусной остановки, а также преодолеть «последнюю милю» пути.

2. Значительный технологический скачок. Самокаты стали надежнее, мощнее и долговечнее. Были усовершенствованы батареи, обеспечивающие большой пробег на одном заряде, системы управления стали более интуитивными и безопасными, а появление складных моделей упростило хранение и транспортировку. Все это сделало электросамокат привлекательным не только для развлечения, но и для практического использования в повседневной жизни.

3. Инвестиционный бум. Успех сервисов по прокату электросамокатов, таких как Lime, Bird и других, привлек огромные инвестиции. Это позволило компаниям расширить масштабы своей деятельности, улучшить качество сервиса и сделать электросамокаты доступными для широкой публики. Инвесторы увидели огромный потенциал в долевой экономике (шеринге) и поняли, что электросамокаты — это не просто

транспорт, а новый тренд, изменяющий ландшафт городской мобильности.

Изменения в транспортной отрасли, связанной с использованием СИМ, происходят стремительно. Задача, поставленная в данной статье: проанализировать имеющиеся открытые отечественные и зарубежные источники информации о частоте и качестве применения СИМ, а также понять дальнейшие пути развития этого перспективного направления транспорта.

Становление СИМ в мире

Сервисы проката — это новая реальность с точки зрения ценностного предложения; это явление уже характеризуется экспертами как «революция микромобильности». В ряде зарубежных стран революция микромобильности началась значительно раньше, чем в России. Популярные за границей компании аренды машин, такие как ZipCar или City Car Share, были основаны еще в 2000 гг.; компании же, связанные с прокатом электровелосипедов или самокатов, такие как Lime или Bird, были основаны в 2017 г. Можно утверждать, что революция микромобильности происходит именно в настоящий момент, и началась она в мире не более 8 лет тому назад. При этом именно рынок аренды электровелосипедов, электросамокатов стал отправной точкой в этом процессе. Темпы внедрения и простоты освоения для пользователей (Adoption rate — термин, используемый при описании этого явления в зарубежной литературе) сыграли здесь ключевую роль [3].

Доступность и удобство — вот два кита, на которых держится популярность любых сервисов, будь то онлайн-платформа или системы городского транспорта. В последнее время велосипед и его производные (в первую очередь электросамокаты) переживают настоящий ренессанс, становясь неотъемлемым элементом успешных городских стратегий развития транспортной

инфраструктуры. Ключ к этому успеху — продуманная и удобная инфраструктура.

В погоне за комфортом и экологичностью многие города по всему миру популяризируют и уже имеют развитые велосети, превратившие велосипед из средства передвижения для энтузиастов в массовый вид транспорта. Примеров тому множество. Амстердам и Копенгаген, безусловные лидеры, демонстрируют, как грамотно выстроенная инфраструктура может изменить городскую жизнь; в Амстердаме доля велосипедных поездок достигает 40% [4]. Секрет успеха кроется в исторически сложившейся велосипедной культуре, плоском рельефе и компактных размерах города. Бережливость голландцев, традиционно ценивших практичность и экономичность, также сыграла свою роль. Городская планировка Амстердама способствует безопасному и комфортному передвижению велосипедистов благодаря развитой сети велодорожек, специальным светофорам и парковкам. В такой среде появление любых СИМ становится вполне логичным явлением.

Копенгаген прошел более сложный путь в развитии своей транспортной системы, столкнувшись в середине прошлого века со значительными транспортными проблемами. В результате реформ, связанных в том числе с развитием велосипедного движения в городе, сегодня 35% жителей Копенгагена ежедневно используют велосипеды для поездок на работу [4]. Это стало возможным благодаря масштабным инвестициям в велоинфраструктуру, созданию специальных велодорожек и программ по пропаганде велосипедного транспорта.

Однако факторы успеха велосипедной инфраструктуры не ограничиваются только плоским рельефом и благоприятными погодными условиями, даже в городах с суровым климатом велосипед находит своих последователей. В Хельсинки, например, после периода домини-

рования автомобилей велосипедный транспорт вновь приобрел популярность. В этом городе были созданы магистрали с односторонним движением для велосипедистов с одновременным снижением скоростного режима для всего транспорта [5].

Известны успешные примеры развития велосипедного движения и за пределами европейских стран. Развитие велоинфраструктуры и культуры использования велосипедов в городах можно проследить на примере Монреаля, Нью-Йорка, Сингапура. Несмотря на различия в климатических условиях, географическом положении, уровне развития транспортной инфраструктуры, эти города демонстрируют эффективность трансформации своей транспортной системы в пользу велопередвижений.

Приведенные выше успешные примеры разных городов мира демонстрируют, что развитие велосипедной инфраструктуры — это не просто модное веяние, а необходимость при создании комфортного, экологически чистого и эффективного городского пространства. Инвестиции в велодорожки, безопасную инфраструктуру и программы поощрения велосипедного транспорта окупаются не только снижением уровня загрязнения окружающей среды, но и повышением качества жизни городских жителей. Это успешная стратегия, которая может быть применена в любом городе, независимо от его географического положения или климатических условий. Более того, СИМ могут спокойно использовать велоинфраструктуру, в результате чего создается мультипликативный эффект, при котором создание инфраструктуры для одного вида транспорта позволяет подтянуть и комфортно использовать целую россыпь современных средств передвижения, тем самым еще больше улучшая качество транспортных услуг и повышая уровень жизни населения городов.

Развитие СИМ в России

Официальной датой появления средств индивидуальной мобильности (СИМ) в правовом поле России следует считать 6 октября 2022 года, поскольку именно в этот день постановлением Правительства РФ № 1769 были утверждены изменения в Правила дорожного движения, регламентирующие в том числе порядок передвижения на электросамокатах, гироскутерах и других подобных транспортных средствах. Данным документом установлен новый термин — «средства индивидуальной мобильности» (СИМ), к числу которых относятся электросамокаты, сигвеи, моноколеса, гироскутеры [6]. Естественно, сами СИМ на дорогах страны появились значительно раньше.

С 2011 г. предприняты активные действия по развитию велосипедного движения в Москве, а с 2014 г. такие шаги стали представлять из себя сформированную программу развития велоинфраструктуры в городе. Целью развития движения средств индивидуальной мобильности (СИМ) является не только повышение мобильности городских жителей, но и стимулирование их физической активности [5].

Согласно аналитическим данным, наблюдался значительный рост продаж средств индивидуаль-

ной мобильности. В частности, продажи гироскутеров среди населения возрастной категории от 7 до 15 лет в 2017 г. продемонстрировали рост на 85%. Однако уже в 2018 г. динамика продаж изменилась: на смену гироскутерам пришли электросамокаты, которые стали востребованы преимущественно среди населения в возрасте от 15 до 70 лет (70% рынка). На фоне пандемии рост продаж СИМ в 2020 г. составил 77% к 2019 г. [7]. В числовом выражении в разницу с 2020 по 2022 г. было продано 540 тыс. электросамокатов и прочих СИМ [8].

К сожалению, информации о количестве СИМ крайне мало, поэтому приходится использовать данные из новостных источников. О проблеме недостатка данных и уровне их достоверности часто говорят эксперты. Так, исследователи из СПбГУ [9] проводили опрос респондентов в количестве 106 человек. Их данные свидетельствуют, что в среднем в каждой семье во владении имеется по 2 транспортных средства, которые можно было бы квалифицировать как СИМ. Данный факт лишь подчеркивает сложность подсчета неавторизированных СИМ на дорогах города.

Самая точная информация предоставляется, как правило, кикшеринговыми компаниями.

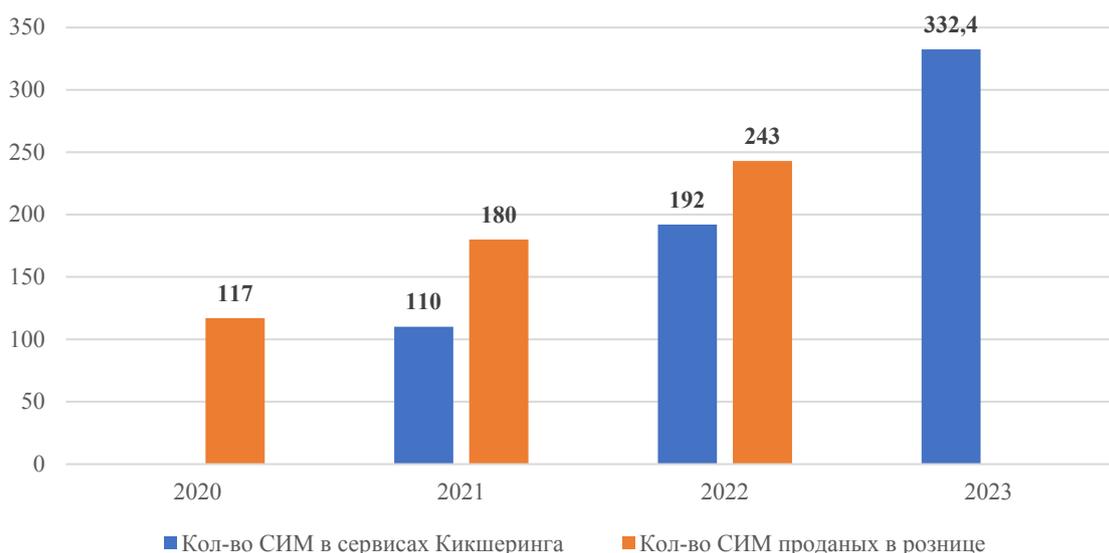


Рис. 1. Количество СИМ на дорогах России, тыс. штук, 2020–2023 гг.

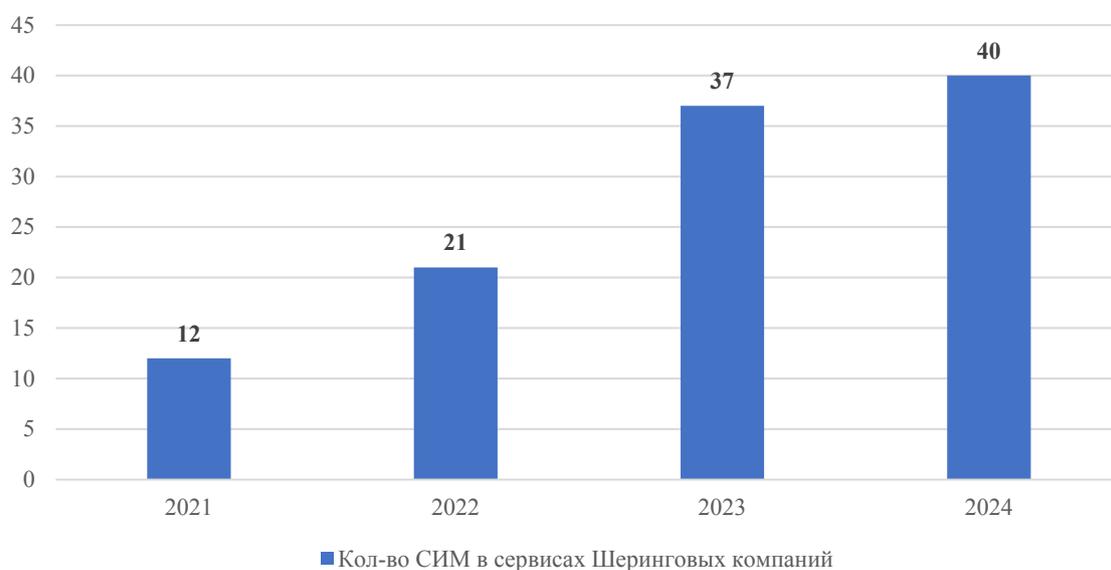


Рис. 2. Количество СИМ в Санкт-Петербурге, тыс. штук, 2021–2024 гг.

В отчетах издательства «Трушеринг» содержится информация о количестве СИМ на дорогах России: так, например, суммарное количество самокатов к концу сезона 2023 г. составило 332,4 тыс. штук, 2022 г. — 192 тыс. штук, 2021 г. — 100–120 тыс. штук (рис. 1).

Динамика роста количества СИМ в Санкт-Петербурге за последние годы представлена на рис. 2.

По данным Ассоциации операторов микро-мобильности, количество СИМ, находящихся в частной собственности физических лиц, в России примерно вдвое превышает парк кикшеринговых СИМ, который насчитывает более 300 тысяч единиц. А за весь 2023 г. было совершено более 250 млн поездок. Безусловно, эксплуатация такого масштабного парка СИМ оказывает существенное влияние на транспортную ситуацию, что актуализирует вопросы безопасности и нормативно-правового регулирования этой сферы как никогда ранее (рис. 3).

Все это свидетельствует о популярности и значительном распространении этого вида транспорта в Российской Федерации.

Выводы

Электросамокаты стали неотъемлемой частью городского пейзажа во многих городах мира. Они предлагают удобную и экологически чистую альтернативу автомобилям и общественному транспорту, способствуя уменьшению загруженности дорог и выбросов вредных веществ. Они могут легко интегрироваться в существующую велоинфраструктуру и предоставлять потребителям удобный и доступный сервис. Стремительный рост популярности электросамокатов породил комплекс новых проблем, требующих оперативного решения: необходимость нормативно-правового регулирования движения, обеспечение безопасности всех участников дорожного движения, организация специализированного парковочного пространства и проблема несанкционированной утилизации транспортных средств. Поэтому развитие данного рынка требует дальнейшего совершенствования законодательной базы и ответственного подхода как со стороны пользователей, так и со стороны компаний-операторов. В заключение следует отметить, что эволюция электро-самоката от детской игрушки до значимого

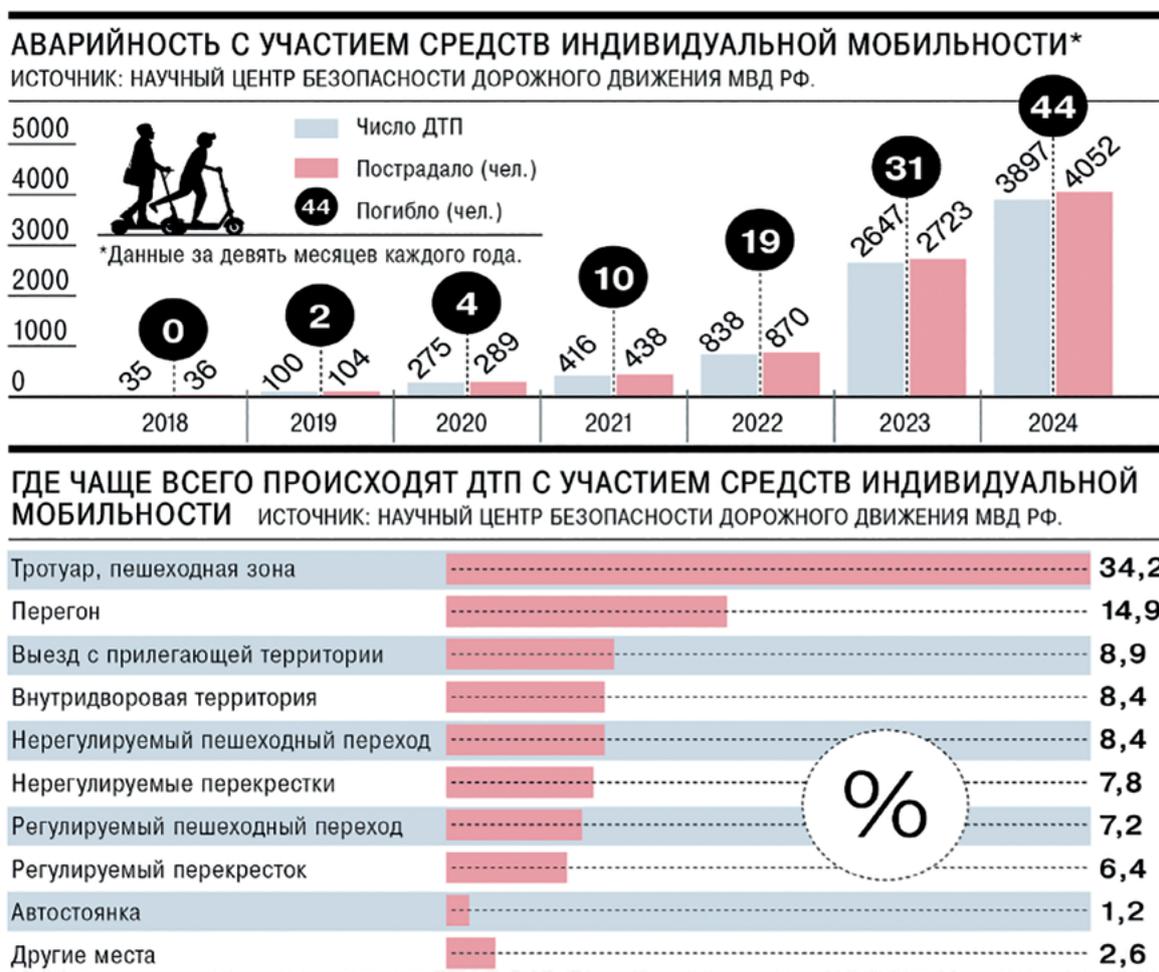


Рис. 3. Статистика аварийности с участием СИМ за период 2018–2024 гг. (по данным [10])

элемента городской инфраструктуры является ярким примером того, как технологический прогресс, инвестиционные вливания и изменяющиеся потребности общества способны обеспечить стремительное развитие нового рынка. Однако для дальнейшего успешного развития данного сегмента необходимо решать возникающие проблемы и создавать условия для его устойчивого и безопасного функционирования.

Список источников

1. Мишина Ю. В. К вопросу об участии в дорожном движении пользователей средств индивидуальной мобильности / Ю. В. Мишина // Правопорядок: история, теория, практика. — 2020. — № 1(24). — С. 44–46.
2. Илькевич С. В. Источники формирования конкурентных преимуществ сервисов проката электросамокатов / С. В. Илькевич // Стратегические решения и риск-менеджмент. — 2019. — Т. 10. — № 3. — С. 238–251.
3. Clewlow R. The micromobility revolution. The Growth of Electric Scooters and Mobility Regulations / R. Clewlow. — SPUR Oakland, 2019. — URL: <https://www.spur.org/sites/default/files/2019-01/Regina%27s%20presentation.pdf>.
4. Cycling for sustainable cities / R. Buehler, J. Pucher (eds.). — Cambridge, MA: MIT Press, 2021. — 488 p.
5. Сагинова О. В. Международный опыт развития мобильности в мегаполисе / О. В. Сагинова // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. — 2019. — № 1. — С. 70–81.

6. Постановление Правительства Российской Федерации от 6 октября 2022 г. № 1769.
7. Горбунова А. Д. Развитие средств индивидуальной мобильности как транспорта «последней мили» / А. Д. Горбунова, И. А. Анисимов // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: материалы V Международной научно-практической конференции. — Омск: СибАДИ, 2020. — С. 132–135.
8. Шамардина Л. Во время пандемии в России взлетели продажи электросамокатов / Л. Шамардина // The Bell. — URL: <https://thebell.io/vo-vremya-pandemii-v-rossii-vzleteli-prodazhi-elektrosamokatov>.
9. Старшов Е. Д. Государственные меры поддержки МСП в 2022–2023 годах: уроки пандемии COVID-19 в условиях «новой реальности» / Е. Д. Старшов, Д. Л. Фелелов, А. А. Голубева, В. Ю. Андрусенко // Менеджмент в России и за рубежом. — 2024. — Т. 5. — С. 17–24.
10. Коммерсант. — 06.11.2024. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7283594>.
- Дата поступления: 11.05.2025
Решение о публикации: 17.06.2025

Контактная информация:

ЛОСИН Леонид Андреевич — канд. техн. наук, заведующий лабораторией; nipigrad@yandex.ru
КАЛИНИН Андрей Андреевич — соискатель; kanfrom@gmail.com

Contemporary Status and Future Prospects for Personal Mobility Devices

L. A. Losin^{1,2}, A. A. Kalinin²

¹Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, 38, Serpuhovskaya str., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Losin L. A., Kalinin A. A. Contemporary Status and Future Prospects for Personal Mobility Devices // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 823–830. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-823-830

Summary

Purpose: To analyse the available domestic and foreign information on the frequency of use and quality of personal mobility devices (PMD) in urban areas. To analyse the PMD development trends. **Methods:** Research on open source publications; statistical data; survey and research data. **Results:** The utilization of personal mobility devices is gaining popularity in Russia and worldwide, particularly in major urban areas. The PMD market growth indicates a significant spread of this type of transport in the Russian Federation and beyond. It is imperative to regulate the PMD movement and ensure safety when using them. The expansion of the PMD market necessitates the refinement of existing legislation. **Practical significance:** The results of the analysis of PMD trends can be used in projects for the development of urban infrastructure, to solve the problems of managing the transport system, and to develop measures to ensure the safety of PMD use. The analysis of PMD infrastructure development cases can facilitate the planning and implementation of micro-mobility projects.

Keywords: Transport system, personal mobility devices, urban mobility, micromobility, transport infrastructure, electric scooter, kick-sharing.

References

1. Mishina Yu. V. *K voprosu ob uchastii v dorozhnom dvizhenii pol'zovateley sredstv individual'noy mobil'nosti* [On the issue of participation in road traffic of individual mobility device users]. *Pravoporyadok: istoriya, teoriya, praktika* [Law and Order: History, Theory, Practice]. 2020, Iss. 1(24), pp. 44–46. (In Russian)
2. Il'kevich S. V. *Istochniki formirovaniya konkurentnykh preimushchestv servisov prokata elektrosamokotov* [Sources of competitive advantages of electric scooter rental services]. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment* [Strategic Decisions and Risk Management]. 2019, vol. 10, Iss. 3, pp. 238–251. (In Russian)
3. Clewlow R. *The micromobility revolution. The Growth of Electric Scooters and Mobility Regulations*. SPUR Oakland, 2019. Available at: <https://www.spur.org/sites/default/files/2019-01/Regina%27s%20presentation.pdf>.
4. Buehler R., Pucher J. (eds.). *Cycling for sustainable cities*. Cambridge, MA: MIT Press, 2021, 488 p.
5. Saginova O. V. *Mezhdunarodnyy opyt razvitiya mobil'nosti v megapolise* [International experience in developing mobility in metropolis]. *ETAP: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika* [ETAP: Economic Theory, Analysis, Practice]. 2019, Iss. 1, pp. 70–81. (In Russian)
6. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 6 oktyabrya 2022 g. № 1769* [Decree of the Government of the Russian Federation dated October 6, 2022 № 1769]. (In Russian)
7. Gorbunova A. D., Anisimov I. A. *Razvitie sredstv individual'noy mobil'nosti kak transporta "posledney mili"* [Development of individual mobility devices as the last mile transport]. *Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii: materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Architectural, Construction and Road Transport Complexes: Problems, Perspectives, Innovations: materials of the V International Scientific and Practical Conference]. Omsk: SibADI Publ., 2020, pp. 132–135. (In Russian)
8. Shamardina L. *Vo vremya pandemii v Rossii vzleteli prodazhi elektrosamokotov* [Electric scooter sales skyrocketed in Russia during the pandemic]. The Bell. Available at: <https://thebell.io/vo-vremya-pandemii-v-rossii-vzleteli-prodazhi-elektrosamokotov>.
9. Starshov E. D., Fefelov D. L., Golubeva A. A., Andrusenko V. Yu. *Gosudarstvennye mery podderzhki MSP v 2022–2023 godakh: uroki pandemii COVID-19 v usloviyakh "novoy real'nosti"* [State support measures for SMEs in 2022–2023: lessons of the COVID-19 pandemic in the "new reality" conditions]. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom* [Management in Russia and Abroad]. 2024, vol. 5, pp. 17–24. (In Russian)
10. Kommersant. 06.11.2024. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/7283594>. (In Russian)

Received: May 11, 2025

Accepted: June 17, 2025

Author's information:

Leonid A. LOSIN — PhD in Engineering, Laboratory Head; nipigrad@yandex.ru

Andrei A. KALININ — Postgraduate student; kanfrom@gmail.com



УДК 624.21

Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста

И. В. Чаплин, А. В. Паторняк, С. В. Ефимов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Для цитирования: Чаплин И. В., Паторняк А. В., Ефимов С. В. Совершенствование системы эксплуатации искусственных сооружений за счет применения цифровых двойников на примере железнодорожного моста // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 831–838. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838

Аннотация

Статья посвящена актуальным проблемам проектирования, эксплуатации и мониторинга мостовых сооружений в контексте цифровизации транспортной отрасли. **Цель:** Разработка и применение цифровых двойников для повышения надежности и безопасности эксплуатируемых мостовых сооружений. **Метод:** На примере эксплуатируемого железнодорожного моста выделены недостатки традиционных подходов к управлению инфраструктурой. Авторы предлагают решение, основанное на применении цифровых двойников — комплексной системы виртуальных (цифровой информационной и расчетной) моделей и фактического сооружения с обеспечением взаимосвязи между ними за счет различных элементов (систем автоматизированного и периодического мониторинга, надзорных мероприятий и др.) для контроля технического состояния объектов в режиме реального времени. **Результаты:** В статье описана цифровая информационная модель моста, адаптированная для контроля и мониторинга отдельных показателей (деформации, частоты и др.). Особенностью модели является динамическая детализация элементов, что снижает вычислительную нагрузку. Кроме того, предложена автоматизированная оценка не только показания датчиков систем мониторинга с расчетными граничными параметрами, но и с требованиями действующих нормативных документов. Такой подход позволяет оперативно выявлять отклонения, в первую очередь существенно снижающие безопасность движения подвижного состава. **Практическая значимость:** Исследование подтверждает, что цифровые двойники повышают надежность мостов за счет прогнозирования дефектов и оперативного реагирования. Авторы статьи акцентируют внимание на необходимости развития отечественной нормативной базы и внедрения машинного обучения для анализа долгосрочных тенденций изменения технического состояния сооружений. Результаты исследования свидетельствуют о перспективности цифровых двойников как инструмента обеспечения устойчивости транспортной инфраструктуры в условиях растущих нагрузок.

Ключевые слова: Информационное моделирование, Технологии информационного моделирования (ТИМ), Building Information Modeling (BIM), мостовые сооружения, транспортная инфраструктура, надежность, цифровой двойник, мониторинг.

Введение

Сферы проектирования, строительства и эксплуатации мостовых сооружений достаточно широко регламентированы, поскольку мосты

относятся к наиболее важным ответственным объектам, составляющим основу транспортной отрасли нашей страны. Мостовые сооружения должны обеспечивать безопасный пропуск обра-

щающейся нагрузки на всем протяжении своего жизненного цикла, что достигается развитием системы эксплуатации и мониторинга [1].

Множество компаний в разных сферах активно внедряют цифровые технологии, включая применение цифровых двойников. Наряду с зарубежным программным обеспечением в последнее время отечественными организациями активно развиваются импортнезависимые информационные продукты. Транспортная отрасль не является исключением, однако на сегодняшний день существует ряд нерешенных проблем, связанных как с проектированием транспортных сооружений, так и с цифровизацией транспортной отрасли:

1. Невысокая эффективность традиционных методов проектирования (технология 2D-CAD). Многоступенчатые процессы проектирования занимают немало времени и ресурсов. Еще больше времени уходит на процессы согласования проекта (инициация → планирование (разработка) → выполнение → контроль → завершение).

2. Ограниченность временных и человеческих ресурсов. Требуется постоянный мониторинг и анализ данных в реальном времени для повышения эффективности систем и оперативного реагирования на изменения. Однако количество линейного персонала и оборудования для данной цели ограничено, что делает ручное отслеживание всех параметров затруднительным или вовсе невозможным.

3. Высокая степень субъективности имеющихся методик прогнозирования развития дефектов на мостовых сооружениях, которые могут оказывать значимое влияние на безопасность движения подвижного состава. Отсутствуют эффективные технологии для моделирования развития и предсказания возникновения и развития аварийных ситуаций.

4. Проблемы в объективной методике проектирования систем мониторинга транспортных сооружений, например риск недостаточного кон-

троля основных несущих элементов или заложения в проект необоснованно большого количества датчиков [2–4].

5. Отсутствие требований к свойствам цифровых двойников, а также порядку и перечню элементов связи между цифровой моделью и реальным объектом.

Часть из вышеприведенных вопросов может быть решена за счет применения единого подхода к регламентированию свойств по разработке цифровых двойников мостов, под которыми понимается комплексная система виртуальных (цифровой информационной и расчетной) моделей и реального сооружения с обеспечением взаимосвязи между ними за счет различных элементов (систем автоматизированного и периодического мониторинга, надзорных мероприятий и др.) для контроля технического состояния объектов в режиме реального времени [5].

Имеющиеся в открытом доступе результаты исследований показали, что применение цифровых двойников снижает затраты на обслуживание и продлевает срок службы основных несущих конструкций мостов за счет своевременного выявления и устранения проблем [6, 7]. Целью исследования является разработка подхода по применению цифровых двойников для мониторинга технического состояния мостовых сооружений на примере эксплуатируемого железнодорожного моста.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран эксплуатируемый металлический железнодорожный мост. На рис. 1 представлена схема данного трехпролетного моста по состоянию до июня 2020 года.

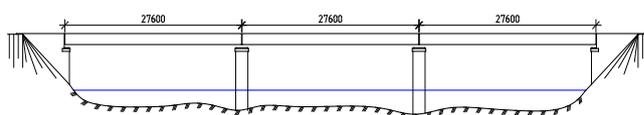


Рис. 1. Схема старого моста до 2020 года

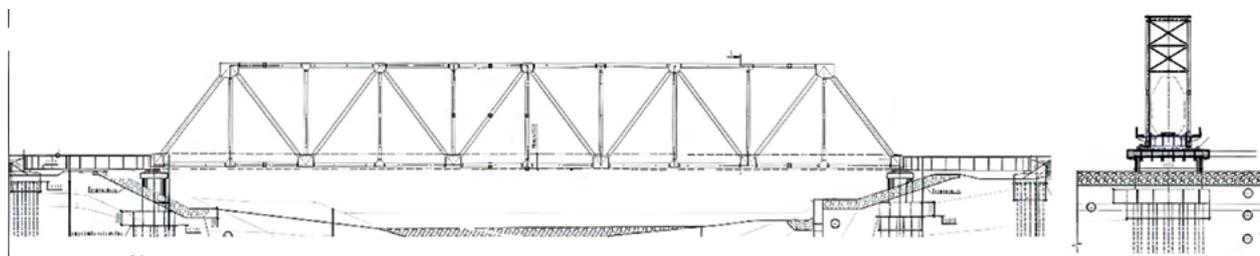


Рис. 2. Схема нового моста с 2020 года

Сооружение было построено в 1930 году, а в 2014 году была выполнена реконструкция объекта. Конструктивно мост представлял собой трехпролетную разрезную систему с металлическими пролетными строениями, выполненными в виде сплошностенчатых балок длиной по 27,6 м. Промежуточные опоры — массивные сборно-монолитные. Фундамент промежуточных опор — массивный, на естественном основании.

В зоне расположения моста русло водотока было сужено и имело неустойчивый характер. При эксплуатации сооружения эти факторы в совокупности с высокой скоростью течения реки в период паводков приводили к интенсивному развитию общего размыва русла и местных размывов у опор. В июне 2020 года при скорости течения водотока 7 м/с произошел подмыв и опрокидывание одной из русловых опор, что привело к обрушению пролетных строений моста. Наличие на данном мостовом переходе качественной системы диагностики и мониторинга его технического состояния позволило бы снизить тяжесть последствий.

За несколько месяцев после обрушения было выполнено строительство нового моста. Основное русло водотока по новой схеме было перекрыто пролетным строением со сквозными главными фермами расчетной длиной 110,0 м, на котором уложены железобетонные плиты безбалластного мостового полотна. Береговые пролетные строения выполнены в виде металлических сплошностенчатых балок с ортотропной плитой проезжей части с ездой на балласте расчетной

длиной 18,2 м. Промежуточные опоры устроены массивными с фундаментом на свайном основании. Схема построенного нового моста представлена на рис. 2.

На сегодняшний день на сооружении установлена система мониторинга, измеряющая ряд показателей (частоту колебаний опор, крен опор, деформации элементов пролетного строения со сквозными главными фермами, температуру элементов, нагрузку на ось от подвижного состава и т. д.), однако их эффективное использование ограничено отсутствием интеграции измеряемых параметров с цифровой моделью объекта, а также недостаточным количеством элементов связей между цифровой моделью и реальным объектом.

На первом этапе решения задачи создания цифрового двойника была разработана цифровая информационная модель моста (рис. 3) в соответствии с нормативными документами [8] и опытом моделирования [9, 10]. Данная модель стала основой для формирования цифрового двойника.

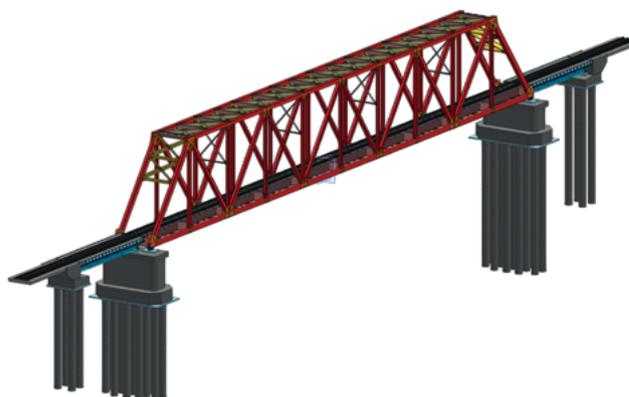


Рис. 3. Цифровая информационная модель моста

Примеры контролируемых параметров элементов моста

| Параметр | Кодировка | Нормативные (расчетные) значения | Фактические значения | Результат оценки соответствия |
|---|--------------------|---|----------------------|-------------------------------|
| Мостовое полотно | | | | |
| Толщина балласта под шпалой, м | thicknessBallast | 0,25–0,6 м | 0,35 | соответствует |
| Тип шпал | typeSleepers | железобетонные/ деревянные | железо- бетонные | соответствует |
| Тип рельс | typeRail | P65 | P65 | соответствует |
| Контрприспособления | counter-fixtures | Да, при $L_M > 50$ / нет, при $L_M < 50$ | 160 | соответствует |
| Эксцентриситет пути, м | trackEccentricity | от –0,05 м до 0,05 | 0,01 | соответствует |
| Перекося рельс, м | railSkew | $\leq 0,006$ | 0,001 | соответствует |
| Эпюра шпал на мосту | diagramSleeper | ≥ 2000 | 2000 | соответствует |
| Пролетные строения | | | | |
| Превышение узлов опирания на опоре, м | NodePointElevation | от –0,006 до 0,006 | 0,002 | соответствует |
| Опоры | | | | |
| Класс бетона по прочности | ConcreteStrength | $\geq B25$ | B35 | соответствует |
| Крен опоры вдоль моста, ‰ | SupportTiltAlong | $\leq 2,0$ | 1,0 | соответствует |
| Частота собственных колебаний опоры, Гц | oscillationPeriod | $\geq 2,0$ | 2,5 | соответствует |
| Уровень местного размыва, м | SoilErosionLevel | $\leq 7,0$ | 2,0 | соответствует |

Следует отметить, что установленная система мониторинга измеряет параметры, для большинства из которых не требуется объемная подробная модель. Поэтому одной из особенностей модели цифрового двойника является адаптация детализации и наполненность информацией в зависимости от решаемых задач и анализируемых параметров. В модели цифрового двойника детально могут быть проработаны только анализируемые элементы, а не все сооружение, что снижает вычислительную нагрузку и время на подготовку модели.

Конструкции мостов, как правило, имеют определенный перечень параметров, значения которых должны находиться в заранее назначенных границах. Границы устанавливаются и назначаются на этапе проектирования сооружения в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Отклонения этих параметров за пределы установленных границ будет с большой долей вероятности свидетельствовать

о нарушении нормальной работы конструкции и необходимости проведения восстановительных мероприятий.

На втором этапе исследования для рассматриваемого сооружения был предложен алгоритм автоматизированного анализа ряда параметров для основных конструкций моста (мостовое полотно, пролетные строения и опоры), для которых выделены допустимые диапазоны изменения данных на основании требований нормативных документов и проведения расчетов на действие внешних нагрузок. В таблице представлены примеры контролируемых параметров для выбранных конструкций.

На рис. 4 представлен автоматизированный анализ информации на примере некоторых позиций.

Расчеты конструкций наиболее целесообразно выполнять с построением конечно-элементных моделей, адаптированных и имеющих функции динамического изменения контролируемых пара-

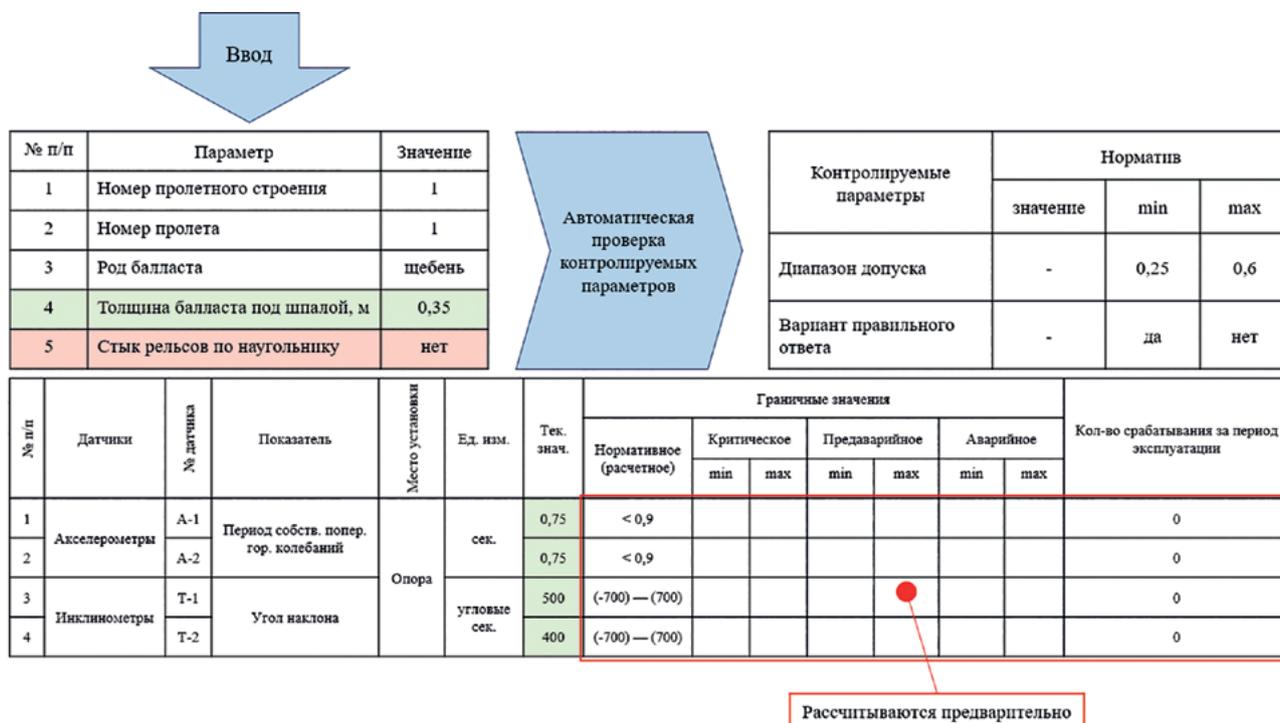


Рис. 4. Пример представления автоматической проверки информации

метров в зависимости от изменения эксплуатационных данных по мосту.

На третьем (завершающем) этапе исследования были частично проработаны элементы связи цифровой модели и реального объекта. Связь (получение данных) от реального объекта с цифровой моделью должна обеспечиваться за счет проведения периодических надзорных и диагностических мероприятий (осмотры, обследования, инструментальная диагностика и др.), а также импорта данных в режиме реального времени с датчиков систем мониторинга.

Связь от цифровой модели к реальному объекту должна осуществляться в виде потока данных о соответствии или несоответствии контролируемых параметров, заложенных в цифровом двойнике (см. таблицу), а также реализации конкретных действий для устранения выявленного несоответствия. Такими элементами связи в структуре ОАО «РЖД» могут являться диспетчер, мостовая или путевая бригада, мостоиспытательная станция и т.д.

Накопление данных в виде причин появления несоответствий, дефектов, сроков их устранения, типа выполненных мероприятий по их устранению позволит снизить субъективность имеющихся методик прогнозирования изменения технического состояния сооружений.

Результаты

В рамках исследования создана цифровая информационная модель моста, которая легла в основу модели цифрового двойника. Модель адаптирована для интеграции с системой мониторинга, что позволяет анализировать контролируемые параметры конструкции в реальном времени. Особенностью такой модели является возможность детализации только анализируемых элементов, что снижает вычислительную нагрузку и ускоряет процесс обработки данных.

Для конструкций мостового полотна, пролетных строений и опор выделены ключевые параметры. Их допустимые диапазоны установлены на основе нормативных требований, что позво-

ляет автоматически идентифицировать отклонения, угрожающие безопасности сооружения.

Предложен алгоритм, и описаны основы методики автоматизированного анализа контролируемых параметров на примере эксплуатируемого железнодорожного моста с выделением источников обмена данными. Предложенный подход является на текущий момент частично реализованным и требует более глубокой проработки в части третьей компоненты цифрового двойника — отладки элементов связей между цифровой моделью и реальным объектом.

Выводы

Применение цифровых двойников для мониторинга мостовых сооружений представляет инновационный подход, улучшающий управление и обслуживание мостов, а возможность контроля появления или развития дефектов приводит к повышению надежности сооружения.

Для назначения режимов эксплуатации сооружений полученную информацию с датчиков системы мониторинга необходимо сравнивать с требованиями норм проектирования, а также с указаниями отраслевых документов по содержанию.

Применение цифровых двойников целесообразно в современных условиях цифровизации строительной отрасли. Необходима модернизация подходов, в том числе в транспортной сфере. Для полной реализации потенциала цифрового двойника любого мостового сооружения требуется тесная кооперация системы мониторинга с цифровой моделью, внедрение алгоритмов машинного обучения и нейросетей для анализа долгосрочных тенденций и прогнозирования оценки технического состояния, а также расширение нормативной базы, регулирующей использование цифровых двойников в транспортной отрасли.

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что цифровые двойники — ключевой инструмент для повышения надеж-

ности и безопасности мостовых сооружений в условиях растущих требований к инфраструктуре и цифровизации строительной отрасли.

Список источников

1. Яшнов А. Н. Сквозная система мониторинга технического состояния мостов / А. Н. Яшнов // Новые технологии в мостостроении. — 2022. — С. 114–119.
2. Яшнов А. Н. Развитие мониторинга технического состояния мостов / А. Н. Яшнов, П. Ю. Кузьменков, Е. О. Иванов // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 7. — С. 14–18.
3. Яшнов А. Н. Результаты опытной эксплуатации системы мониторинга металлического решетчатого пролетного строения / А. Н. Яшнов, П. Ю. Кузьменков, Е. О. Иванов // Политранспортные системы. — 2020. — С. 49–53.
4. Иванов А. Н. Мониторинг технического состояния автодорожного моста через реку Пашенку / А. Н. Иванов, П. Ю. Кузьменков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2016. — № 2(37). — С. 20–27.
5. Safronova M. A. Digital Twin of bridge structures / M. A. Safronova // Молодая наука. — 2024. — Pp. 244–248.
6. Kaewunruen S. Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions / S. Kaewunruen, J. Sresakoolchai, W. Ma, O. Phil-Ebosie // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — P. 18.
7. Kasser M. Digital twins in bridge engineering for streamlined maintenance and enhanced sustainability / M. Kasser, M. Viviani, M. Franciosi // Automation in Construction. — 2024. — Vol. 168 (A). — P. 19.
8. Ефимов С. В. Особенности нормативного регулирования в сфере информационного моделирования мостовых сооружений / С. В. Ефимов, А. В. Паторняк, Н. В. Козак // Вестник гражданских инженеров. — 2025. — № 1(108). — С. 101–110.
9. Ефимов С. В. Применение технологии информационного моделирования при разработке проекта ремонта мостового сооружения / С. В. Ефимов, А. В. Паторняк,

И. В. Чаплин // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2024. — № 3(60). — С. 113–121.

10. Ефимов С. В. Проблемы внедрения технологий информационного моделирования в России на примере разработки проекта реконструкции путепровода / С. В. Ефимов, Е. С. Кокоева, И. В. Чаплин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2025. — Т. 27. — № 2. — С. 226–237.

Дата поступления: 01.07.2025

Решение о публикации: 29.07.2025

Контактная информация:

ЧАПЛИН Иван Владимирович — канд. техн. наук;
chaplin@sibgups.ru

ПАТОРНЯК Алексей Владимирович — аспирант;
patornyak_av@mail.ru

ЕФИМОВ Стефан Васильевич — канд. техн. наук;
esvmt@mail.ru

Авторы выражают благодарность Сергею Владимировичу Бочкареву (ООО «Синтез АТ», Санкт-Петербург, Россия, bochkareffsv@yandex.ru) за совместную плодотворную работу над материалами для данной статьи.

Application of a Digital Twin Model in an Operational System for Monitoring Railway Bridges

I. V. Chaplin, A. V. Patornyak, S. V. Efimov

Siberian Transport University, Russia, 191, Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

For citation: Chaplin I. V., Patornyak A. V., Efimov S. V. Application of a Digital Twin Model in an Operational System for Monitoring Railway Bridges // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 831–838. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-831-838

Summary

This paper addresses the current issues of the design, operation and monitoring of bridge structures in the context of digitalisation within the transport industry. **Purpose:** To develop digital twins to improve the reliability and safety of operational bridge structures. **Method:** The case study of an operational railway bridge highlights the limitations of traditional infrastructure management approaches. The authors propose a solution based on digital twins: a comprehensive system comprising interconnected virtual models and physical structures, as well as automated and periodic monitoring systems and supervisory measures. This solution allows the technical condition of facilities to be monitored in real time. **Results:** This paper describes a digital information model of the bridge that has been adapted for monitoring individual indicators such as deformation and frequency. A notable feature of the model is its ability to dynamically detail elements, thereby reducing the computational load. Additionally, it proposes an automated assessment of not only the monitoring system sensor readings with calculated boundary parameters, but also of the existing regulatory requirements. This approach enables rapid identification of deviations that significantly reduce the safety of rolling stock movement. **Practical significance:** This study confirms that digital twins enhance the reliability of bridges by predicting defects and enabling a rapid response. The authors emphasize the importance of developing a domestic regulatory framework and implementing machine learning to analyse long-term trends in the technical condition of structures. The study's findings suggest that digital twins have the potential to ensure the sustainability of transport infrastructure in the face of increasing loads.

Keywords: Information modelling, BIM (Building Information Modelling), IMT (Information Modelling Technology), bridge structures, transport infrastructure, reliability, digital twin, monitoring.

References

1. Yashnov A. N. Skvoznaya sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya mostov [End-to-end monitoring system for technical condition of bridges]. *Novye tekhnologii v mostostroenii* [New technologies in bridge construction]. 2022, pp. 114–119. (In Russian)
2. Yashnov A. N., Kuzmenkov P. Yu., Ivanov E. O. Razvitie monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya mostov [Development of technical condition monitoring of bridges]. *Put' i putevoye khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2021, Iss. 7, pp. 14–18. (In Russian)
3. Yashnov A. N., Kuzmenkov P. Yu., Ivanov E. O. Rezul'taty opytной ekspluatatsii sistemy monitoringa metallichesкого reshchatatogo proletnogo stroeniya [Results of trial operation of monitoring system for metal lattice span structure]. *Politransportnye sistemy* [Politransport systems]. 2020, pp. 49–53. (In Russian)
4. Ivanov A. N., Kuzmenkov P. Yu. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya avtodorozhnogo mosta cherez reku Pashenku [Technical condition monitoring of road bridge over the Pashenka River]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Siberian State Transport University]. 2016, Iss. 2(37), pp. 20–27. (In Russian)
5. Safronova M. A. Digital Twin of bridge structures. *Molodaya nauka* [Young science]. 2024, pp. 244–248.
6. Kaewunruen S., Sresakoolchai J., Ma W., Phil-Ebosie O. Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions. *Sustainability*. 2021, vol. 13, p. 18.
7. Kasser M., Viviani M., Franciosi M. Digital twins in bridge engineering for streamlined maintenance and enhanced sustainability. *Automation in Construction*. 2024, vol. 168 (A), p. 19.
8. Efimov S. V., Patornyak A. V., Kozak N. V. Osobnosti normativnogo regulirovaniya v sfere informatsionnogo modelirovaniya mostovykh sooruzheniy [Features of regulatory control in the field of information modeling of bridge structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2025, Iss. 1(108), pp. 101–110. (In Russian)
9. Efimov S. V., Patornyak A. V., Chaplin I. V. Primenenie tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya pri razrabotke proekta remonta mostovogo sooruzheniya [Application of information modeling technology in development of bridge structure repair project]. *Vestnik inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of Engineering School of Far Eastern Federal University]. 2024, Iss. 3(60), pp. 113–121. (In Russian)
10. Efimov S. V., Kokoyeva E. S., Chaplin I. V. Problemy vnedreniya tekhnologiy informatsionnogo modelirovaniya v Rossii na primere razrabotki proekta rekonstruktsii puteprovoda [Problems of implementation of information modeling technologies in Russia on the example of overpass reconstruction project development]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Construction]. 2025, vol. 27, Iss. 2, pp. 226–237. (In Russian)

Received: July 01, 2025

Accepted: July 29, 2025

Author's information:

Ivan V. CHAPLIN — PhD in Engineering;

chaplin@sibgups.ru

Aleksey V. PATORNYAK — Postgraduate Student;

patornyak_av@mail.ru

Stefan V. EFIMOV — PhD in Engineering; esvmt@mail.ru