## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 20, выпуск 2, 2023

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

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

**Издатель**
Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022

**Адрес учредителя**
190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32; e-mail: izvestia@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 29.12.2015, № 6/6)

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

**Журнал имеет** институт рецензирования

**Журнал распространяется**
Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33315

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

**Панычев Александр Юрьевич**, главный редактор, канд. экон. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Канаев Андрей Константинович**, заместитель главного редактора, д-р техн. наук, профессор, 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

**Агеев Сергей Александрович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

**Атрошенко Светлана Алексеевна**, д-р техн. наук, профессор, ИПМаш РАН, СПбГУ, 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, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

**Ибатов Марат Кенесович**, д-р техн. наук, профессор, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

**Кондратьева Лидия Никитовна**, д-р техн. наук, профессор, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

**Кручек Виктор Александрович**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

**Ли Фушэн**, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

**Лукашевич Анатолий Анатольевич**, д-р техн. наук, профессор, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

**Маилян Левон Рафаэлович**, действительный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, профессор, ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

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

**Матросов Александр Васильевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

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

**Скотникова Маргарита Александровна**, д-р техн. наук, профессор, СПбПУ, Высшая школа машиностроения, Санкт-Петербург, Россия

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

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

**Соколов Владимир Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор, ТИУ, Тюмень, Россия

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

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

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

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

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

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

**Ширунов Гурий Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Фото на обложке** предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС

**Подписано в печать** с оригинал-макета 19.06.2023.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 30.
Тираж 300 экз. Заказ. Цена свободная.

**Отпечатано в типографии** ООО «Паблит», 127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023

## SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 20, issue 2, 2023

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 ЭА94514 dated December 19, 2022

**Founder's address**

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

**Publisher's address**

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

**Mass media registration certificate number**
ПИ N ФС2-7499 dd. 06.04.2005
issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

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

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

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

**The journal has** the Peer-review division

**The journal is destributed**
Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33315

## JOURNAL STAFF

**Alexander Panychev**, Editor-in-chief, PhD in Economics, Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Andrey Kanayev**, Deputy Editor-in-chief, D. Eng. Sci., 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

**Sergey Ageev**, 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

**Svetlana Atroshenko**, D. Eng. Sci., Professor, RAS Institute for Applied Mechanics, St. Petersburg 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., Associate 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

**Marat Ibatov**, D. Eng. Sci., Professor, Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

**Lidia Kondratyeva**, D. Eng. Sci., Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

**Viktor Kruchek**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

**Li Fusheng**, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

**Anatoly Lukashevich**, D. Eng. Sci., Associate Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

**Levon Mailyan**, full member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

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

**Alexander Matrosov**, D. Phys.-Math. Sci., Professor, St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

**Alexander Nikitin**, D. Eng. Sci., 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

**Margarita Skotnikova**, D. Eng. Sci., Professor, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

**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

**Vladimir Sokolov**, D. Eng. Sci., Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen, 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

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

**Alexander Uzdin**, D. Eng. Sci., Associate 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

**Guriy Shirunov**, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

## → ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

**Н. С. Бушуев, К. П. Мухина**
Развитие транспортного комплекса Российской Федерации под давлением санкций 2022 года ..... 267

**А. В. Кабанов**
Инновационные подходы к разработке организационно-технологической документации в транспортном строительстве ..... 273

**Н. А. Слободчиков, А. И. Дергачев, О. Н. Куранова**
Перспективное развитие новых услуг сервиса в городском транспортном потоке ..... 279

**Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, А. А. Фомин, П. Ю. Либерман**
Особенности управления местной работой на железнодорожных участках, обслуживающих прямые отправительские маршруты ..... 290

**Ф. А. Смирнов, А. В. Новичихин, К. Е. Ковалев**
Совершенствование грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте: концепция и инструментарий ..... 302

**Е. П. Дудкин, Хусам Аббас Мохсин Абужваид**
Основы методики выбора и обоснования видов городского общественного транспорта Ирака ..... 314

**К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин**
Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели ..... 325

**Ж. В. Иванова, Г. А. Богданова**
Создание комфортных условий эксплуатации выставочных комплексов в жарком климате ..... 336

## → СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

**В. М. Петров, Л. Д. Терехов**
Зависимость гидравлических характеристик самотечных канализационных трубопроводов от способа проведения их бестраншейного ремонта ..... 348

**Л. Н. Парамонова, С. Г. Амеличкин, Е. А. Махонько, Л. Д. Терехов**
Применение дезинфектантов нового поколения в решении современных проблем обеззараживания в водопроводно-канализационном хозяйстве ..... 357

**А. А. Блюдов, Д. В. Пивоваров, Г. Ю. Пронин**
Распределение мощности кодов с наименьшей избыточностью алфавитов в зависимости от количества бит и кодового расстояния ..... 365

**Д. П. Голоскоков, А. В. Матросов**
Изгиб секторальной пластины: использование систем компьютерной алгебры ..... 376

**Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров, Н. И. Иост**
Перспективные технологии визуализации опасностей ..... 385

**Е. Н. Быстров, А. В. Харламова**
Обеспечение средствами индивидуальной защиты
работников предприятий транспортной сферы ..... 396

**А. В. Харламова, П. А. Белова**
Анализ и оценка качества поверхностных вод
Приозерского района Ленинградской области ..... 404

**Н. А. Елисеев, Ю. Г. Параскевопуло, Н. Н. Елисеева**
Аксонометрические проекции в России: вчера, сегодня, завтра ..... 414

**Н. Г. Кобозева, А. В. Новичихин**
Разработка метода оценки рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом
государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций ..... 424

**А. Б. Завьялов, О. И. Копытенкова, А. М. Евстафьев**
Исследование смягчения вибраций и переизлученного шума
в зданиях, создаваемых при движении железнодорожного транспорта ..... 433

**Н. А. Горбунова, А. А. Федосеенко, М. С. Абу–Хасан**
Экологическая оценка объектов окружающей среды
при проведении инженерно-экологических изысканий ..... 441

## → ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

**М. В. Зверев, А. А. Комайданов, А. Н. Смирнов**
Уточненная методика испытаний стояночного тормоза грузовых вагонов ..... 448

**Д. С. Кривошея**
Железнодорожный дисковый тормоз с термоизолированными
узлами трения, содержащими материалы с различными фрикционными свойствами ..... 457

**В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин**
Моделирование режима электрического торможения тепловоза с последовательным
возбуждением коллекторных тяговых двигателей при использовании силового
полупроводникового преобразователя ..... 463

**П. В. Борисов, А. А. Воробьев**
Обзор алгоритма программного обеспечения для диагностики остаточного ресурса литий-
ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава ..... 471

**А. Н. Сычугов, В. Н. Михейчиков, М. В. Чернышов**
Применение нейронных сетей для распознавания объектов на железнодорожном транспорте ..... 478

**Н. В. Канашин, Д. А. Афонин**
Опыт применения цифровых нивелиров и программного обеспечения CREDO НИВЕЛИР
для мониторинга инженерных сооружений ..... 492

# CONTENTS

## PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

**N. S. Bushuev, K. P. Mukhina**
Development of the Transport Complex of the Russian Federation under the Pressure of Sanctions in 2022 ..... 271

**A. V. Kabanov**
Innovating Approaches to Organizational-Technological Documentation in Transport Construction ..... 277

**N. A. Slobodchikov, A. I. Dergachev, O. N. Kuranova**
Prospective Development of New Service Offerings in the Urban Traffic Flow ..... 288

**G. I. Palamarchuk, V. N. Kuzmenkova, A. A. Fomin, P. Yu. Liberman**
Features of Managing Local Work on Railway Sections Serving Direct Outbound Routes ..... 300

**F. A. Smirnov, A. V. Novichikhin, K. E. Kovalev**
Improving Freight and Commercial Work on Railway Transport: Concept and Tools ..... 312

**E. P. Dudkin, H. A. Abujwaid**
Basic Methodology for Selecting and Substantiating Iraqi Urban Public Transport Modes ..... 323

**K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin**
The Procedure for Planning the Operation of Low-Intensity Railway Lines: Logistical Aspects and Neural Network Models ..... 334

**Zh. V. Ivanova, G. A. Bogdanova**
Creating Comfortable Conditions for the Operation of Exhibition Complexes in Hot Climates ..... 345

## HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

**V. M. Petrov, L. D. Terehov**
Dependence of Hydraulic Characteristics of Gravity Sewer Pipelines on the Method of Trenchless Repair ..... 355

**L. N. Paramonova, S. G. Amelichkin, E. A. Makhonko, L. D. Terekhov**
The Use of New Generation Disinfectants in Solving Modern Disinfection Problems in the Water Supply and Sewerage Sector ..... 363

**A. A. Blyudov, D. V. Pivovarov, G. Yu. Pronin**
Power Distribution of Codes with the Lowest Alphabet Redundancy Depending on the Number of Bits and Code Distance ..... 374

**D. P. Goloskokov, A. V. Matrosov**
Sector Plate Bending: Using Computer Algebra Systems ..... 383

**Yu. N. Kanonin, O. I. Tikhomirov, N. I. Iost**
Prospective Technologies of Hazard Visualization ..... 393

**E. N. Bystrov, A. V. Kharlamova**
Provision of Personal Protective Equipment for Employees of Transport Enterprises ..... 402

**A. V. Kharlamova, P. A. Belova**
Analysis and Assessment of the Quality of Surface Waters in the Priozersky District of the Leningrad Region ..... 411

**N. A. Eliseev, Yu. G. Paraskevopulo, N. N. Eliseeva**
Axonometric Projections in Russia: Yesterday, Today, Tomorrow ..... 421

**N. G. Kobozeva, A. V. Novichikhin**
Development of a Method for Assessing the Risks of Providing State Transportation with Railway Rolling Stock in Emergency Situations ..... 430

**A. B. Zavyalov, O. I. Kopytenkova, A. M. Evstafiev**
Study of Mitigation of Vibrations and Re-Radiated Noise in Buildings Created by Railway Traffic ..... 438

**N. A. Gorbunova, A. A. Fedoseenko, M. S. Abu-Khasan**
Ecological Assessment of Environmental Objects During Engineering and Environmental Surveys ..... 445

## → GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

**M. V. Zverev, A. A. Komaidanov, A. N. Smirnov**
Refined Test Procedure for the Parking Brake of Freight Cars ..... 454

**D. S. Krivosheya**
Railway Disc Brake with Thermally Insulated Friction Assemblies Containing Materials with Different Friction Properties ..... 461

**V. Yu. Evseev, A. N. Savoskin**
Simulation of Electric Braking Mode of a Diesel Locomotive with Series Excitation of Commutator Traction Motors Using a Power Semiconductor Converter ..... 469

**P. V. Borisov, A. A. Vorob'ev**
Review of the Software Algorithm for Diagnosing the Residual Life of Lithium-Ion Batteries of Traction Rolling Stock ..... 476

**A. N. Sychugov, V. N. Mikheychikov, M. V. Chernyshov**
Application of Neural Networks for Object Recognition in Railway Transportation ..... 490

**N. V. Kanashin, D. A. Afonin**
Experience in the Use of Digital Levels and CREDO NIVELIR Software for Monitoring Engineering Structures ..... 498

УДК 625.1:625.7:656.02

# Развитие транспортного комплекса Российской Федерации под давлением санкций 2022 года

**Н. С. Бушуев, К. П. Мухина**

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

**Для цитирования:** *Бушуев Н. С., Мухина К. П.* Развитие транспортного комплекса Российской Федерации под давлением санкций 2022 года // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 267–272. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-267-272

## Аннотация

**Цель:** Анализ развития транспортного комплекса Российской Федерации под давлением санкций 2022 года со стороны недружественных стран по многим аспектам нашей жизнедеятельности. Ранее мы уже рассматривали влияние санкций США и Западной Европы на развитие транспортного комплекса Российской Федерации [1]. Сейчас же можно сделать некоторые выводы о развитии ситуации и рассмотреть следующие вопросы: какие пути были найдены с целью выхода из трудного положения; как изменилась экономика транспортной отрасли за 2022 и начало 2023 года; какие перспективы ждут отрасль в дальнейшем? **Методы:** Сравнение характеристик состояния и развития различных основных видов транспортной отрасли за 2022 год с показателями предыдущего периода 2020–2021 годов. **Результаты:** Показано, что с конца февраля 2022 года, после начала специальной военной операции, на Российскую Федерацию пошло сильное давление в виде целого ряда санкций, в основном со стороны США и Западной Европы. Санкции сильно повлияли на транспортный комплекс России: нехватка запчастей для автомобилей, невозможность импорта по железнодорожным путям и закрытие воздушного пространства. В настоящее время практически каждый день появляются новые подробности, связанные с введением дополнительных санкций, их последствиями, а также с фактами, подтверждающими все большую устойчивость транспортной отрасли России к этим санкциям. **Практическая значимость:** Показана необходимость дальнейшего анализа фактов, подтверждающих устойчивость работы транспортной отрасли России в условиях новых вызовов и глобального давления на экономику России недружественных стран Запада и США.

**Ключевые слова:** Санкции, транспортный комплекс, авиационный транспорт, железнодорожный транспорт, грузоперевозки.

## Авиационный транспорт

В конце февраля 2022 года Евросоюз и США начали ограничивать воздушное пространство для российских авиаперелетов. На самом «пике» полеты ограничили 36 стран, на что был сделан зеркальный ответ. Закрытие неба некоторыми странами не означает того, что возможность перелетов полностью закрывается. Авиаперелеты можно совершать через другие страны, например через Турцию и ОАЭ.

В конце января 2023 появились новости о том, что США начали давление на Турцию по вопросу о запрете российским авиакомпаниям летать на самолетах «Боинг» (американское производство). Маловероятно, что власти Турции пойдут на реализацию такого сильного удара по экономике страны. В 2022 году Турцию посетили около пяти миллионов россиян, а летом совершалось до 750 рейсов в неделю [2].

Один из важных вопросов, касающихся авиатранспорта, — это стоимость перелетов. Благодаря субсидированию цены на авиаперелеты не сильно подскочили даже в летний период, хотя стоимость керосина за 2022 год возросла на 45 % [3].

Если объем пассажирских перевозок авиатранспортом в России в 2022 году стабилизировался, то Западная Европа и США стали довольно сильно проигрывать из-за закрытого неба. В конце 2022 года некоторые авиакомпании Западной Европы начали выступать за отмену санкций [4]. Российская Федерация нашла способы для обхода санкций и устояла в непростой период, а недружественные страны до сих пор несут сильные потери в экономическом аспекте. Более того, в Евросоюзе боятся, что с окончанием пандемии в Китае европейский рынок станет неконкурентоспособным, ведь воздушное пространство для Китая станет открытым [4].

Еще рано говорить о свободных авиаперелетах, но Еврокомиссия уже начала призывать Российскую Федерацию к отмене транссибирских платежей с авиакомпаний, использующих для перелетов небо над территорией России [5]. Такая плата с советских времен взимается с иностранных компаний на полеты через Сибирь, что сокращает им полет на 4000 км и приносит России доход около 1 миллиарда рублей в год. Многие считают, что в данной ситуации такой призыв, а скорее «угроза», выглядит анекдотично. Продолжение переговоров по данному вопросу в перспективе, очевидно, будет достаточно жестким.

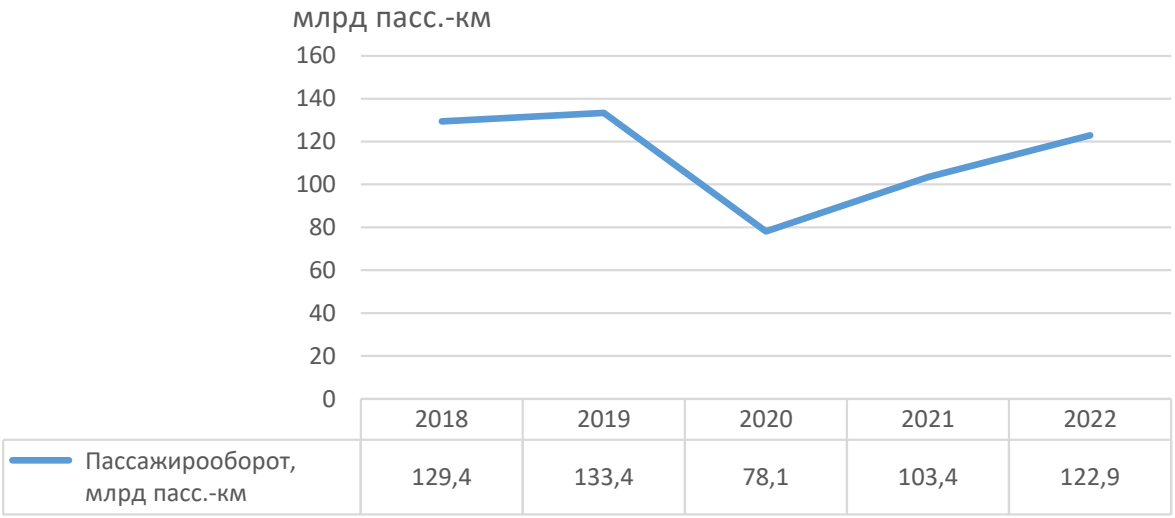
**Железнодорожный транспорт**

По прогнозам на 2022 год, крупнейший российский железнодорожный перевозчик — ОАО «РЖД» — должен был снизить объем погрузки на 7 % в связи с запретом экспорта. По факту погрузка снизилась всего на 3,6 % [5]. Несмотря на санкции, железнодорожная отрасль превзошла все ожидания. Так, доходы ОАО «РЖД» превысили 2 триллиона рублей за 2022 год, что выше на 15 %, чем в прошлом году. По сравнению с 2021 годом, прирост пассажиров составил 7,8 %, а перевозка контейнеров выросла на 0,3 % [6].

Прежде всего прирост пассажиров связан с закрытием аэропортов на юге России. Анапа, Геленджик, Краснодар — одни из самых популярных мест российского отдыха, в которые летом 2022 года было достаточно трудно попасть. Конечно, можно было воспользоваться аэропортами в соседних городах, например Сочи и Минеральные воды, но далее все равно пришлось бы задействовать другой трансфер. Поэтому с экономической точки зрения удобнее было добираться поездами дальнего следования. Для наглядности можно обратить внимание на общую статистику пассажиропотока с 2018 по 2022 год (рисунок), данные взяты с официального сайта ОАО «РЖД» [7].

Многие логистические цепочки, которые были отработаны ранее, в 2022 году стали неактуальными. Например, сократился грузопоток из Китая в Европу через Казахстан, поэтому импорт перенаправили на Азию и Восток. Объем заявок на перевозки в восточном направлении, наоборот, вырос на 30 % по отношению к 2021 году [8]. По БАМу и Транссибу было перевезено 158 млн тонн. Номенклатура перевозимого груза также изменилась, на протяжении 10 лет 50–60 % груза составлял уголь, теперь же в больших количествах везут металлы, минеральные удобрения и зерно [9].

Главный перевозчик Российской Федерации — ОАО «РЖД» — не собирается останавливаться на достигнутом, в 2023 году провозная способность Восточного полигона по плану будет




Статистика пассажиропотока железнодорожным транспортом с 2018 по 2022 год

достигать 173 тонн [10]. В дальнейшем планируется модернизировать железнодорожную инфраструктуру, что повысит скорость движения поездов, а также увеличит пропускную и провозную способность магистралей.

**Автомобильный транспорт**

Ситуация с автомобильным транспортом до сих пор не очень оптимистичная. Рынок запчастей «остается пустым», цены на автомобили растут, а содержать их становится дороже. По официальным данным, в 2022 году стоимость автомобилей выросла на 24 %, несмотря на то, что инфляция зарегистрирована в два раза меньше. Иномарки подорожали уже на 40 % [11]. Частично авторынок сейчас спасает параллельный импорт, автодилеры отдают предпочтение китайским маркам автомобилей.

В части положительной динамики можно отметить производство отечественных автомобилей. Так, компания «АвтоВАЗ» организовала перезапуск автомобилей Lada Granta и Niva в более легких версиях, без сложной электроники [12]. Несмотря на то, что процент проданных машин снизился на 46 %, долю на рынке удалось нарастить почти на 7 %. В дальнейшем автомобильная компания планирует расширить свое производство на заводах закрывшихся компаний, которые ушли из России, например на заводе Nissan в Санкт-Петербурге. Также планируют вернуть сложную, «неантикризисную» электронику в автомобили и заняться новыми проектами.

Что касается гарантийного ремонта машин и страховки, то автодилеры несут большие потери. Иностранные компании, покинувшие Россию, не расторгли гарантийные отношения. АвтоВАЗ, который является посредником, не в полной мере предоставляет запчасти. Номенклатура не покрывает весь потребный перечень, некоторые запчасти приходится ждать 2–3 месяца. Остается открытым вопрос о сроках гарантийного обслуживания. Сегодня, при определенных обстоятельствах, автовладельцы могут требовать от автодилеров полную замену автотранспорта или возмещение ущерба по полной стоимости. Многие считают, что в данной ситуации стоит полностью пересмотреть законодательство Российской Федерации, так как достать новую иномарку физически невозможно [13].

С грузовыми автомобилями происходит такая же ситуация, лидирующую позицию в России держат КАМАЗ и «Урал». Процент проданных автомобилей упал, но производство осталось на том же уровне. Санкции не повлияли на сборку новых автомобилей, КАМАЗу больше не нужны импортные запчасти. Всего за 9 месяцев удалось перейти на собственное производство, конечно, с помощью дружественных стран. Например, часть деталей, такие как двигатели и коробки передач, поставляется из Казахстана [14]. Перспективы развития рынка грузовых автомобилей аналогичны легковым. Тяжелее всего сейчас приходится частным транспортным компаниям, которые эксплуатируют зарубежные грузовые автомобили. Многие из них пытаются закупать китайские запчасти, которые в 4 раза дешевле оригинальных, но срок службы у них гораздо ниже.

## Заключение

Вызывает интерес дальнейший анализ фактов, подтверждающих устойчивость работы транспортной отрасли России в условиях новых вызовов и глобального давления на экономику России недружественных стран Запада и США.

## Библиографический список

1. Бушуев Н. С. Влияние санкций США и Западной Европы на развитие транспортного комплекса России / Н. С. Бушуев, К. П. Мухина // Инфраструктура транспорта. — 2021. — № 2(2). — С. 5–9.

2. Россиян лишают перелетов в Турцию. — URL: https://amp.ridus.ru/rossiyan-lishayut-pereletov-v-turciyu-poddastsya-li-ankara-shantazh-mintorga-ssha-399314.html.

3. Авиакеросин в РФ в 2022 году подорожал более чем на 45 %. — URL: https://www.interfax.ru/russia/874814.

4. Западные авиакомпании неожиданно захотели летать через Россию. — URL: https://ruposters.ru/news/12-12-2022/zapadnie-aviakompanii-neozhidanno-zahoteli-letat-cherez-rossiyu-proigrivayut-konkurentsiyu.

5. Еврокомиссия призвала Россию отменить транссибирские платежи с авиакомпаний. — URL: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/01/17/959272-evrokomissiya-prizvala-rossiyu-otmenit-transsibirskie-platezhi.

6. Рельсовая волна. — URL: https://www.rbc.ru/newspaper/2022/12/13/639470f99a79476b67c1a6cb.

7. ОАО «РЖД». — URL: https://www.rzd.ru/.

8. Итоги работы ОАО «РЖД» в 2022 году превзошли ожидания. — URL: https://gudok.ru/news/press/?ID=1627323.

9. 2022: факты, события, тенденции. — URL: https://vgudok.com/lenta/2022-fakty-sobytiya-tendencii-itogi-uhodyashchego-goda-dlya-seti-rzhd-i-smezhnyh-otrasley-v.

10. Аккуратные рекорды БАМ. — URL: https://vgudok.com/lenta/akkuratnye-rekordy-bam-novyy-etap-modernizacii-vostochnogo-poligona-ne-udarit-po-zhd-otrasli.

11. Цены на иномарки установили рекорд: что будет с ценами в 2023 году. — URL: https://www.autonews.ru/news/63cab6989a79471d8cc113f4.

12. АВТОВАЗ готовит облегченные комплектации автомобилей. — URL: https://v1.ru/text/auto/2022/03/29/70725677/.

13. Автопроизводители ушли, а гарантия осталась. — URL: https://www.zr.ru/content/articles/933793-ushli-brendy-garantiya-ne-dejs/.

14. КАМАЗу больше не требуются импортные запчасти. — URL: https://www.ixbt.com/live/offtopic/dvoynaya-igra-v-odni-vorota-ili-afera-s-treugolnikom-pri-prodazhe-avtomobilya.amp.html.

Дата поступления: 15.05.2023
Решение о публикации: 31.05.2023

**Контактная информация:**
БУШУЕВ Николай Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; 2009bushuev@rambler.ru
МУХИНА Ксения Павловна — студент; xenia.mukhinaa@gmail.com

# Development of the Transport Complex of the Russian Federation under the Pressure of Sanctions in 2022

**N. S. Bushuev, K. P. Mukhina**

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

**For citation:** Bushuev N. S., Mukhina K. P. Development of the Transport Complex of the Russian Federation under the Pressure of Sanctions in 2022 // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 267–272. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-267-272

## Summary

**Purpose:** To analyze the development of the transport complex of the Russian Federation under the pressure of sanctions in 2022 from unfriendly countries in many aspects of our life. Previously, we have already considered the impact of the US and Western European sanctions on the development of the transport complex of the Russian Federation [1]. Now we can draw some conclusions about the development of the situation and consider the following questions: what ways have been found to overcome a difficult situation; how has the economy of the transport industry changed in 2022 and the beginning of 2023; what prospects lie ahead of the industry in the future? **Methods:** Comparison of the characteristics of the state and development of various main types of transport industry in 2022 with the indicators of the previous period of 2020-2021. **Results:** It is shown that since the end of February 2022, after the start of the special military operation, the Russian Federation has been under strong pressure in the form of a number of sanctions, mainly from the United States and Western Europe. The sanctions have greatly affected the Russian transport complex: a shortage of spare parts for cars, the inability to import by rail and the closure of airspace. Currently, new details are emerging almost every day related to the introduction of additional sanctions, their consequences, as well as facts confirming the increasing resilience of the Russian transport industry to these sanctions. **Practical significance:** The necessity of further analysis of the facts confirming the stability of the Russian transport industry in the face of new challenges and global pressure on the Russian economy of unfriendly Western countries and the United States is shown.

**Keywords:** Sanctions, transport complex, aviation transport, railway transport, freight transportation.

## References

1. Bushuev N. S., Mukhina K. P. Vliyanie sanktsiy SShA i Zapadnoy Evropy na razvitie transportnogo kompleksa Rossii [Influence of sanctions of the USA and Western Europe on the development of the transport complex of Russia]. *Infrastruktura transporta* [Transport infrastructure]. 2021, Iss. 2(2), pp. 5–9. (In Russian)

2. *Rossiyan lishayut pereletov v Turtsiyu* [Russians are denied flights to Turkey]. Available at: https://amp.ridus.ru/rossiyan-lishayut-pereletov-v-turciyu-poddastsya-li-ankara-shantazh-mintorga-ssha-399314.html. (In Russian)

3. *Aviakerosin v RF v 2022 godu podorozhal bolee chem na 45 %* [Aviation kerosene in the Russian Federation in 2022 has risen in price by more than 45 %]. Available at: https://www.interfax.ru/russia/874814. (In Russian)

4. *Zapadnye aviakompanii neozhidanno zakhoteli letat' cherez Rossiyu* [Western airlines suddenly wanted to fly through Russia]. Available at: https://ruposters.ru/news/12-12-2022/zapadnie-aviakompanii-neozhidanno-zahoteli-letat-cherez-rossiyu-proigrivayut-konkurentsiyu. (In Russian)

5. *Evrokomissiya prizvala Rossiyu otmenit' transsibirskie platezhi s aviakompaniy* [The European Commission called

on Russia to cancel trans-Siberian payments from airlines]. Available at: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/01/17/959272-evrokomissiya-prizvala-rossiyu-otmenit-transsibirskie-platezhi. (In Russian)

6. *Rel'sovaya volna* [Rail wave]. Available at: https://www.rbc.ru/newspaper/2022/12/13/639470f99a79476b67c1a6cb. (In Russian)

7. *OAO "RZhD"* [Russian Railways JSC]. Available at: https://www.rzd.ru/. (In Russian)

8. *Itogi raboty OAO "RZhD" v 2022 godu prevzoshli ozhidaniya* [The results of the work of Russian Railways in 2022 exceeded expectations]. Available at: https://gudok.ru/news/press/?ID=1627323. (In Russian)

9. *2022: fakty, sobytiya, tendentsii* [2022: facts, events, trends]. Available at: https://vgudok.com/lenta/2022-fakty-sobytiya-tendencii-itogi-uhodyashchego-goda-dlya-seti-rzhd-i-smezhnyh-otrasley-v. (In Russian)

10. *Akkuratnye rekordy BAM* [Accurate BAM records]. Available at: https://vgudok.com/lenta/akkuratnye-rekordy-bam-novyy-etap-modernizacii-vostochnogo-poligona-ne-udarit-po-zhd-otrasli. (In Russian)

11. *Tseny na inomarki ustanovili rekord: chto budet s tsenami v 2023 godu* [Prices for foreign cars set a record: what will happen to prices in 2023]. Available at: https://www.autonews.ru/news/63cab6989a79471d8cc113f4. (In Russian)

12. *AVTOVAZ gotovit oblegchennye komplektatsii avtomobiley* [AVTOVAZ prepares lightweight vehicle configurations]. Available at: https://v1.ru/text/auto/2022/03/29/70725677/. (In Russian)

13. *Avtoproizvoditeli ushli, a garantiya ostalas'* [The automakers are gone, but the warranty remains]. Available at: https://www.zr.ru/content/articles/933793-ushli-brendy-garantiya-ne-dejs/. (In Russian)

14. *KAMAZU bol'she ne trebuyutsya importnye zapchasti* [KamAZ no longer needs imported parts]. Available at: https://www.ixbt.com/live/offtopic/dvoynaya-igra-v-odni-vorota-ili-afera-s-treugolnikom-pri-prodazhe-avtomobilya.amp.html. (In Russian)

Received: May 15, 2023
Accepted: May 31, 2023

**Author's information:**
Nikolay S. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; 2009bushuev@rambler.ru
Ksenia P. MUKHINA — Student; xenia.mukhinaa@gmail.com

УДК 69.003:65

# Инновационные подходы к разработке организационно-технологической документации в транспортном строительстве

**А. В. Кабанов**

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

**Для цитирования:** *Кабанов А. В.* Инновационные подходы к разработке организационно-технологической документации в транспортном строительстве // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 273–278. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-273-278

## Аннотация

**Цель:** Определить современный инновационный состав организационно-технологической документации при строительстве крупных транспортных объектов. Провести анализ отраслевой нормативно-технической документации, требований профильных саморегулируемых организаций. Определить классификацию и специфику строительства новых типов крупных транспортных объектов, для которых разрабатывается организационно-технологическая документация. Определить востребованность и практическую применимость документации в составе ППР (проектов производства работ). Изложить основы подготовки организации строительства транспортных объектов, которая охватывает производственно-хозяйственную, технологическую и управленческую инфраструктуру подрядных строительных организаций, определяет систему связей между соответствующими подразделениями генподрядных и субподрядных строительных организаций. **Методы:** Анкетирование и экспертный опрос инженерно-технических работников строительных организаций. Экспертная оценка производственной документации, вероятностное моделирование при оценке производственных процессов, методы многокритериальной оценки вариантов организационно-технологической документации. **Результаты:** Сформулированы основные требования к составу организационно-технологической документации для новых типов современных объектов транспортного строительства. Разработаны основы для отраслевых методических документов по организационно-технологической подготовке работы подрядных строительных организаций. **Практическая значимость:** Повышение эффективности строительства крупных транспортных объектов. На основе инновационных организационно-технологических решений снижается себестоимость строительно-монтажных работ и сокращаются сроки строительства.

**Ключевые слова:** Проект производства работ, организационно-технологическая документация, система организации строительства.

Современное транспортное строительство характеризуется возведением новых транспортных объектов [1], проекты которых реализуются за последние 15–20 лет. Это высокоскоростные железнодорожные магистрали; транспортно-пересадочные узлы; межрегиональные и внутригородские мультимодальные транспортные магистрали; транспортно-технологические комплексы; автомобильные и железнодорожные подходы к крупным инфраструктурным объектам; транспортные обходы мегаполисов и др.

Спецификой организации строительства таких объектов является [2–4]:

– наличие главных (генеральных) и промежуточных целей строительства;

– производство строительных работ и сдача в эксплуатацию этапами, очередями, пусковыми комплексами;

– сложная система комплексных, специализированных и объектных строительных потоков организации строительства;

– многокритериальность при принятии организационно-технологических решений.

Учет этой специфики современных объектов требует инновационных подходов для многоуровневого системного организационно-технологического проектирования (разработка взаимоувязанных ПОС, ПОР, ППР) строительных работ, что следует из характера и комплекса работ строящегося транспортного объекта.

Объекты транспортного строительства по компонентам, входящим в них, и комплексам работ подразделяются на:

– транспортные линейные;

– транспортные площадочные;

– транспортно-инфраструктурные.

Взаимодействие строительных подрядных организаций при воздействии первых двух типов объектов достаточно широко изучено, и их особенности отражены в работах [5–10].

Если говорить об их классифицировании, с точки зрения организационно-технологического проектирования производства работ общим для них является комплексный поток, который реализует генеральную цель строительства — сдачу в эксплуатацию транспортного линейного (площадного) объекта. В случае этапного строительства (введение в эксплуатацию по этапам или очередям) мы имеем дело с последовательностью нескольких комплексных потоков, реализующих цели очередей или этапов.

К таким объектам можно отнести:

– транспортные линейные: участки строительства новых железных дорог, электрификация участков главного хода железной дороги, строительство путей на однопутном участке железной дороги и т. д.;

– транспортные площадочные: строительство зданий промышленного и гражданского назначения на транспорте, реконструкция и переустройство станций, строительство искусственных сооружений и т. д.

Проектирование производства работ по строительству таких объектов характеризуется большой размерностью организационно-технологических показателей.

Для поддержания в рабочем состоянии организационно-технических моделей и документации следует руководствоваться динамикой их жизненного цикла (см. табл.), а также следующими особенностями:

– ввиду наличия многочисленных производственных связей и зависимости от изменения производственной ситуации проявляется так называемый каскадный эффект, когда сбой или изменения в одном документе (например, ППРе на отдельный объект) провоцируют необходимость перерасчетов во всей системе с целью достижения оптимума по всей системе ПОС — ППОС — ПОР — ППР;

– наличие множества строительных организаций, участвующих в возведении объекта, но имеющих разный (иногда достаточно низкий) уровень организационно-технологической подготовки. Модель организации строительства

Жизненный цикл организационно-технологической документации при производстве работ

| Период строительства | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Разработка вариантов | Исходно-разрешительный этап | Ресурсно-распределительный этап | Регулирующий этап | Контрольно-оценочный этап | Итоговый этап. Сравнение фактических показателей с нормативами |

должна предусматривать быструю взаимозаменяемость «субподрядчика».

$S_{опт}$ учитывает условия работы генподрядных и субподрядных строительных организаций, характер строящихся объектов, например для объектов площадного типа или объектов линейного типа. Важную роль при этом играет характер формирования строительной продукции. Например:

1) ПОР как составная часть $S_{опт}$ может разрабатываться на годовую программу работ, при этом в него входят объекты или их части, возведение которых предусмотрено в планируемом году;

2) ПОР на часть транспортного объекта, которая вводится в эксплуатацию в первую очередь.

Разработка системы организационно-технологической документации ($S_{опт}$) выполняется в соответствии с нормативно-техническими документами по составлению ППОС, ПОР, ППР. Анкетирование и экспертные опросы показали, что несмотря на выполнение требований соответствующих сводов правил (СП) [5–7], определяющих содержание и назначение этих документов, по востребованности и подходам, существующим на практике, их можно объединить в три группы (рисунок).

**Уровень востребованности организационно-технологической документации**

Первая — объединяет, как правило, модели ППР в объеме **исходно-разрешительных** документов на начальной стадии строительства для получения разрешения на производство работ и необходимых согласований надзорных органов.

Вторая — это документация **ресурсно-распределительного** характера, которая используется как для исходно-разрешительных мероприятий, так и для распределения ресурсов, фронтов работ, сроков работ.

Третья — это комплекс документов **бизнес-регулирующего** характера, который наиболее в полной мере обеспечивает подготовку строительного производства и является системообразующим в достижении целей строительства.

Проведенные автором исследования (с использованием материалов анкетирования в строительных организациях) Северо-Запада показывают, что методы организационно-технологического моделирования и оценки разделяются на три основных направления:

1. Экспертная оценка производственной документации — 78 %.

2. Использование моделей, учитывающих вероятностный характер производственных ситуаций, — 14 %.

3. Использование методов многокритериальной оценки вариантов организационно-технологических моделей — 8 %.

Таким образом, можно сформулировать основные требования к математическому моделированию $S_{опт}$ эффективной системы ППОС — ПОР — ППР.

Группа 1 (см. рисунок) предполагает упрощенную оценку качества организационно-технологической документации. Большую роль при этом играет производственный опыт разработчиков ППОС — ПОР — ППР, доминирующим в оценочных выводах служат указания руководства.

Для решения проблем разработки $S_{опт}$ в таких условиях наиболее удобным будет использование адаптированного метода экспертных оценок.

Группа 2 (см. рисунок) предполагает более жесткое, по сравнению с предыдущим, формальное использование критериев и ограничений. Это требует применения имитационных моделей распределительного типа, которые в полной степени отвечают современным требованиям $S_{опт}$. В рамках требований группы 2 автором разработана методика моделирования $S_{опт}$ с применением траекторной оптимизации, использующей многокритериальный подход (комплекс технико-экономических и организационно-технологических показателей).

Третий подход (см. рисунок) предполагает наличие систем гибких организационно-технологических моделей, использующих вероятностные оценки.

## Библиографический список

1. Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ с изменениями от 17 ноября 2011 г. «Градостроительный кодекс Российской Федерации».

2. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

3. Постановление правительства РФ от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требований к их содержанию».

4. СП 48.13330.2011 «СНиП 12-01—2004 Организация строительства. Актуализированная редакция».

5. СТО НОСТРОЙ 2.33.14—2011. Организация строительного производства. Общие положения.

6. СТО НОСТРОЙ 2.33.51—2011. Организация строительного производства. Подготовка и производство строительных и монтажных работ.

7. Жинкин Г. Н. Система календарных планов для строительства железных дорог / Г. Н. Жинкин // Транспортное строительство. — 1979. — № 5.

8. Жинкин Г. Н. Проблемы совершенствования организации строительства железных дорог / Г. Н. Жинкин // 75 лет Строительному факультету: сборник докладов юбилейной конференции. — СПб.: ПГУПС, 1996.

9. Соловьев С. В. Обоснование организационно-технологической платформы для реализации инвестиционных проектов ОАО «РЖД» / С. В. Соловьев, А. Ю. Панычев, А. Ф. Колос и др. // Актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры: сборник научных трудов. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. — С. 138–146.

10. Олейник П. П. Концепция повышения уровня проектов производства работ / П. П. Олейник // Промышленное и гражданское строительство. — 2020. — № 2. — С. 59–63.

Дата поступления: 15.03.2023
Решение о публикации: 24.04.2023

**Контактная информация:**
КАБАНОВ Александр Васильевич — канд. техн. наук, доц.; avkabanov07@inbox.ru

# Innovating Approaches to Organizational–Technological Documentation in Transport Construction

**A. V. Kabanov**

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

**For citation:** Kabanov A. V. Innovating Approaches to Organizational-Technological Documentation in Transport Construction // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 273–278. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-273-278

**Summary**
**Purpose:** To determine modern innovative composition of organizational-technological documentation at large transport facility construction. To hold the analysis of branch regulatory-technical documentation, relevant self-regulatory organization requirements. To define classification and specifics of the construction of new types of large transport facilities which for, organizational-technological documentation is developed. To determine the relevance and practical applicability of documentation as a part of WPP (work production projects). To outline the basics of the preparation of transport facility construction organization which comprises production-economic, technological and managerial infrastructure of contractor construction organizations, defines the system of relations between relevant subdivisions of general- and sub-contracting constructional enterprises. **Methods:** Questionnaire and expert survey of engineering-technical workers of constructional organizations. Expert evaluation of production documentation, probabilistic modeling at the evaluation of production processes, methods of multi-criteria evaluation of organizational-technological documentation variants. **Results:** Main requirements to organizational-technological documentation composition for new types of modern transport construction facilities are formulated. Foundations for branch methodological documents on organizational-technological preparatory of work of contracting construction organizations have been developed**. Practical significance:** Efficiency improvement of large transport facility construction. On the basis of innovative organizational-technological solutions, prime cost of constructive-installing works is reduced and construction time is cut.

**Keywords:** Work production project, organizational-technological documentation, construction organization system.

## References

1. *Federal'nyy zakon ot 29 dekabrya 2004 g. № 190-FZ s izmeneniyami ot 17 noyabrya 2011 g. "Gradostroitel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law of December 29, 2004 № 190-FZ, as amended on November 17, 2011 "Urban Planning Code of the Russian Federation"]. (In Russian)

2. *Federal'nyy zakon ot 27 dekabrya 2002 g. № 184-FZ "O tekhnicheskom regulirovanii"* [Federal Law of December 27, 2002 № 184-FZ "On Technical Regulation"]. (In Russian)

3. *Postanovlenie pravitel'stva RF ot 16 fevralya 2008 g. № 87 "O sostave razdelov proektnoy dokumentatsii i trebovaniy k ikh soderzhaniyu"* [Decree of the Government of the Russian Federation of February 16, 2008 № 87 "On

the composition of sections of project documentation and requirements for their content"]. (In Russian)

4. *SP 48.13330.2011 "SNiP 12-01—2004 Organizatsiya stroitel'stva. Aktualizirovannaya redaktsiya"* [SP 48.13330.2011 "SNiP 12-01—2004 Organization of construction. Updated edition"]. (In Russian)

5. *STO NOSTROY 2.33.14—2011. Organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva. Obshchie polozheniya* [STO NOSTROY 2.33.14—2011. Organization of construction production. General provisions]. (In Russian)

6. *STO NOSTROY 2.33.51—2011. Organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva. Podgotovka i proizvodstvo stroitel'nykh i montazhnykh rabot* [STO NOSTROY 2.33.51—2011. Organization of construction production. Preparation and production of construction and installation works]. (In Russian)

7. Zhinkin G. N. Sistema kalendarnykh planov dlya stroitel'stva zheleznykh dorog [The system of calendar plans for the construction of railways]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 1979, Iss. 5. (In Russian)

8. Zhinkin G. N. *Problemy sovershenstvovaniya organizatsii stroitel'stva zheleznykh dorog. 75 let Stroitel'nomu fakul'tetu: sbornik dokladov yubileynoy konferentsii* [Problems of improving the organization of railway construction. 75 years of the Faculty of Civil Engineering: a collection of reports of the anniversary conference]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1996. (In Russian)

9. Colov'ev C. V., Panychev A. Yu., Kolos A. F. et al. *Obosnovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy platformy dlya realizatsii investitsionnykh proektov OAO "RZhD". Aktual'nye problemy razvitiya transportnoy infrastruktury: sbornik nauchnykh trudov* [Substantiation of the organizational and technological platform for the implementation of investment projects of Russian Railways. Actual problems of the development of transport infrastructure: a collection of scientific papers]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2018, pp. 138–146. (In Russian)

10. Oleynik P. P. Kontseptsiya povysheniya urovnya proektov proizvodstva rabot [The concept of increasing the level of projects for the production of works]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2020, Iss. 2, pp. 59–63. (In Russian)

Received: March 15, 2023
Accepted: April 24, 2023

**Author's information:**
Alexander V. Kabanov — PhD in Engineering, Associate Professor; avkabanov07@inbox.ru

УДК 656.1

# Перспективное развитие новых услуг сервиса в городском транспортном потоке

**Н. А. Слободчиков, А. И. Дергачев, О. Н. Куранова**

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

**Для цитирования:** *Слободчиков Н. А., Дергачев А. И., Куранова О. Н.* Перспективное развитие новых услуг сервиса в городском транспортном потоке // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 279–289. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-279-289

## Аннотация

**Цель:** Рассматривается один из возможных вариантов решения проблемы загруженности улично-дорожной сети в условиях высокого уровня автомобилизации городов. **Методы:** Описана концепция сервиса «Мобильность как услуга» как одного из прогрессивных методов управления городскими транспортными потоками. Рассмотрены технологии, позволяющие работать данному сервису, при этом повышая эффективность использования транспортных средств. **Результаты:** Проведен анализ сервисов каршеринга, кикшеринга и байкшеринга как системы транспорта «первой и последней мили». **Практическая значимость:** Решением данной проблемы может стать интеграция всех существующих транспортных систем в единую систему, способную в большей степени повлиять на эффективность мобильности пользователей городов.

**Ключевые слова:** Мобильность как услуга, городской транспорт, общественный транспорт, система проката, каршеринг, кикшеринг, байкшеринг, транспорт первой и последней мили.

Высокие темпы развития транспортной мобильности населения в современных городах по всему миру поставили перед обществом серьезную проблему: прежде всего, это ухудшение экологической обстановки, во-вторых, перегруженность улично-дорожной сети и, как следствие, снижение скорости движения, в-третьих — повышение затрат, связанных с транспортировкой пассажиров.

Все человечество стремится решить эту проблему различными способами, из возможных вариантов решения данной проблемы можно отметить, что наиболее эффективным решением является внедрение прогрессивных методов управления городскими транспортными потоками. Одним из таких методов является реализация в городской среде сервиса «Мобильность как услуга», который подразумевает под собой возможность оперативного выбора различных видов транспорта для поездок и способствует отказу людей от использования личного автомобиля в городах.

Сервис «Мобильность как услуга» — это прежде всего интеграция различных форм транспортных услуг в «Единую услугу мобильности», доступную по запросу клиента. В укрупненном виде принципиальную структуру сервиса «Мобильность как услуга» можно представить в следующем виде (рис. 1) [1].

Как видно из рисунка, сервис «Мобильность как услуга» подразумевает изменение формы владения транспортным средством, другими словами, одно транспортное средство должно обслужить как можно большее количество людей.

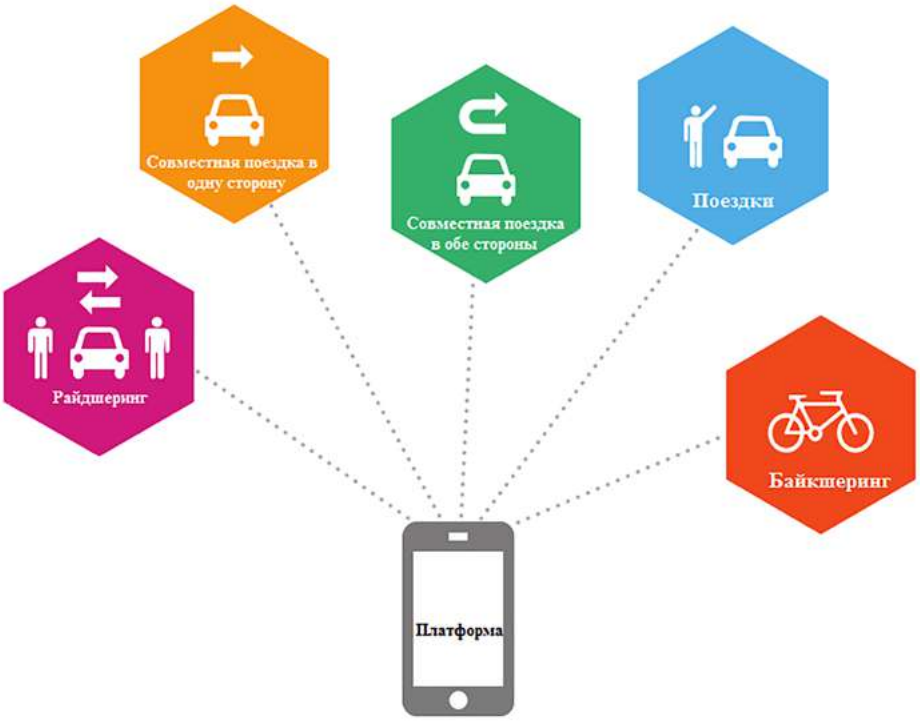



Рис. 1. Структура сервиса «Мобильность как услуга»

Какие же технологии позволяют данному сервису работать и повышать эффективность использования транспортных средств? Это прежде всего каршеринг.

Каршеринг (происходит от двух английских слов — *car* (машина) и *sharing* (обмен), что дословно переводится как «обмен автомобилями») — термин, отражающий суть современного подхода к использованию автомобиля. Он относится к формирующемуся классу «услуг мобильности», которые используют современные технологии для обеспечения доступа к мобильности использованием автомобиля без владения потребителем личным транспортным средством. Он выступает как логическое добавление к традиционным способам обеспечения потребности людей в перевозке, такие как такси и традиционный прокат автомобилей. Основное их отличие от каршеринга — это отсутствие необходимости в современных информационных и коммуникационных технологиях для коммерческой жизнеспособности, в то же время они также используют новые технологии для улучшения обслуживания клиентов [2].

На сегодняшний день в России каршерингом пользуются более 50 000 водителей, суммарное количество автомобилей, задействованное в бизнесе, около 5000, оно постоянно растет. Автопарк состоит из нескольких десятков тысяч транспортных средств.

Услуга каршеринга обычно предполагает доступ к автомобилю, принадлежащему другому физическому или юридическому лицу, за фиксированную стоимость. В течение пользования услугами carsharing пользователь несет ответственность за автомобиль и его состояние.

Данная услуга на территории России пользуется большой популярностью, поэтому в 2021 Центр организации дорожного движения Москвы провел исследование системы каршеринга в Москве на 2021 для получения качественной и количественной оценки данного сервиса [3].

Рис. 2. Диаграмма распределения поездок

Рис. 3. Диаграмма распределения количества поездок по месяцам года

В результате его проведения были получены данные, которые показали, что в 2021 году москвичи пользовались услугами каршеринга 49 миллионов раз, что в среднем составляет 135 тысяч поездок за день, для сравнения — в 2021 году метро воспользовались 2,1 млрд раз, такси — 328 млн раз, а прокатными самокатами и велосипедами — 13,3 млн раз. На рис. 2 представлена диаграмма распределения среднего количества поездок в день.

Как видно из диаграммы, наибольший спрос на услуги каршеринга наблюдается в субботу на протяжении всего года, это объясняется тем, что у большего количества пользователей в этот выходной день поездки совершались для личных дел. При этом наименьший спрос наблюдался по четвергам и понедельникам, это обусловлено тем, что в будние дни пользователи предпочитали использовать общественный транспорт.

При анализе распределения поездок по месяцам были получены данные, показывающие, что наибольший рост спроса на услуги каршеринга наблюдается в летние месяцы, это обусловлено увеличением пользователей в период отпусков. Наименьший спрос при этом приходится на зимние месяцы года, причиной этого может быть использование общественного транспорта как более безопасной альтернативы передвижения, не зависящий от погодно-климатических условий. Данную закономерность можно посмотреть на рис. 3, на котором изображена диаграмма распределения количества поездок по месяцам года.

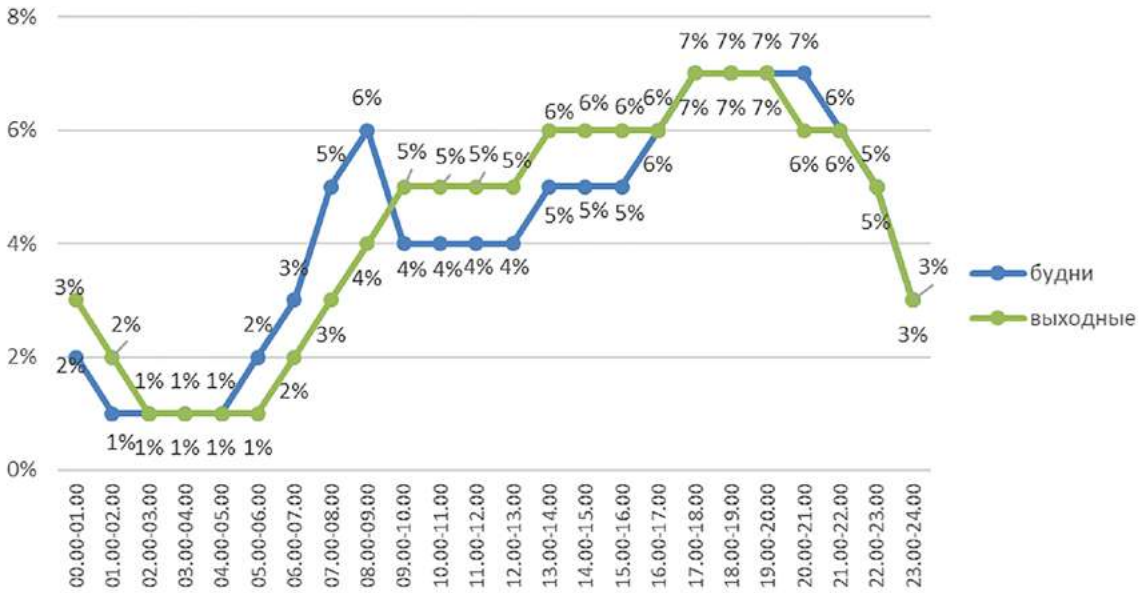



Рис. 4. Диаграмма распределения доли поездок на каршеринге по времени суток

Разница между рабочими и нерабочими днями недели особенно заметна по утренним и дневным показателям. В выходные в утренний час пик количество поездок значительно ниже, чем количество поездок в будни с 5 до 9 часов, при этом в рабочие дни меньше заказов днем — в это время пользователи сервиса на работе или на учебе. Наибольший спрос на пользование услуг каршеринга приходится на утренний и вечерний часы пик в будние дни, в это время пользователи совершают 33 % поездок, при этом среднее расстояние поездки на каршеринге — 16 км, а среднее время аренды машины — 54 минуты с момента бронирования в приложении. На рис. 4 представлена диаграмма распределения доли поездок на каршеринге по времени суток.

Полученные результаты анализа позволяют констатировать, что наблюдается положительная тенденция к значительному увеличению использования услуг каршеринга, в первую очередь рост спроса на услуги может быть связан с тем, что владеть своим автомобилем становится значительно дороже из-за увеличившихся издержек на ремонт и обслуживание, оплату парковок, в результате чего содержание личного автомобиля становится не только просто не выгодно, а, наоборот, обременительно.

Еще одним быстро развивающимся способом удовлетворения потребности в передвижении для населения является кикшеринг (англ. *kicksharing* — дословно переводится как «совместное использование самокатов»), который подразумевает краткосрочную аренду самокатов и электросамокатов по аналогии с каршерингом.

В мире сложилась тенденция, когда пользователи перестали воспринимать самокаты в качестве развлечения, а стали воспринимать его как «транспорт последней мили», который используется для коротких поездок внутри и между районами города. Причем данной услугой все больше пользуются не только молодые люди до 25 лет, но достаточно зрелые люди от 30 до 50 лет. Для определения мероприятий по улучшению данного вида сервиса было проведено исследование аналитиками Центра организации дорожного движения Москвы в 2021 году, в ходе которого была проведена качественная и количественная оценка сервиса.

В ходе исследования было выявлено, что в 2021 году спрос на кикшеринг значительно вырос, за

Рис. 5. Диаграмма распределения количества поездок

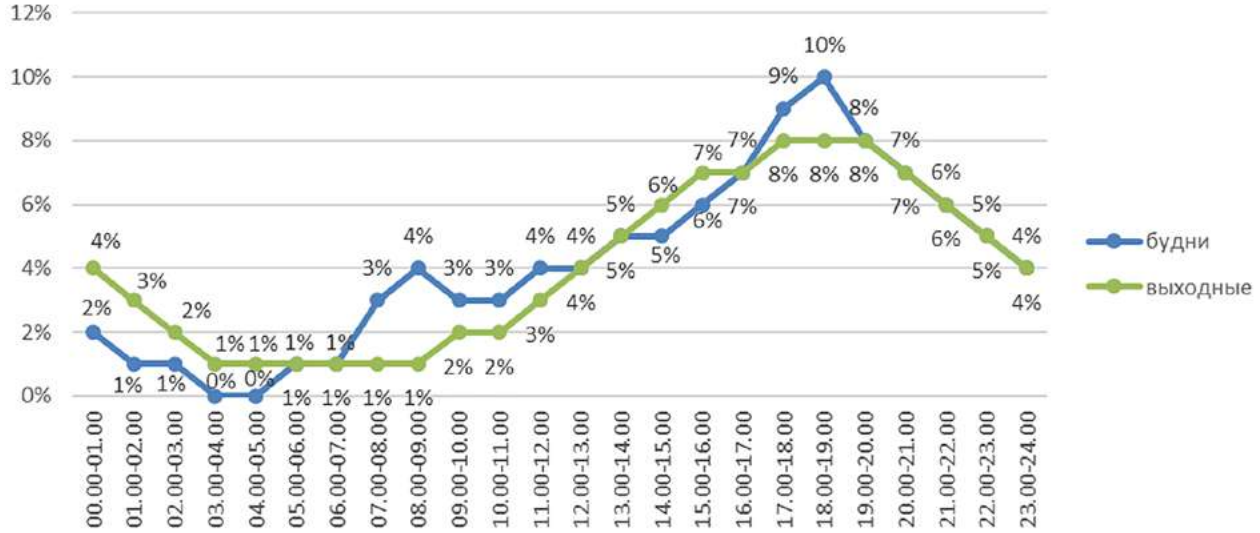



Рис. 6. Диаграмма распределения доли поездок на самокатах

год услугами проката самокатов воспользовались 8,6 миллиона раз, тогда как в 2020-м — ~2 млн раз. За рассматриваемый год москвичи ездили на самокатах 8,6 млн раз — в среднем 35 тысяч аренд каждый день, но при этом такие альтернативы личному транспорту, как каршеринг и такси, остаются более популярными, чем средства индивидуальной мобильности. На рис. 5 представлена диаграмма распределения количества поездок по дням недели в исследуемый период.

Как видно из диаграммы, больший спрос на услуги проката самокатов наблюдается в выходные дни, при этом в рабочие и нерабочие дни кикшерингом пользуются по-разному. В выходные и праздничные дни трафик спроса постепенно растет с 8 утра до 6 вечера, при этом в будни есть два пика: утром с 9 до 10 и вечером с 18 до 20, появление пиковых спросов обусловлено тем, что пользователи все чаще стали использовать самокат для совершения краткосрочных поездок. На рис. 6 представлена диаграмма распределения доли поездок на самокатах.

Период работы кикшеринга в течение года в большей степени зависит от погодных условий. Так, анализ распределения поездок по месяцам, проведенный с апреля по ноябрь, показал, что рост спроса на услуги проката самокатов наблюдается в летние месяцы, это обусловлено

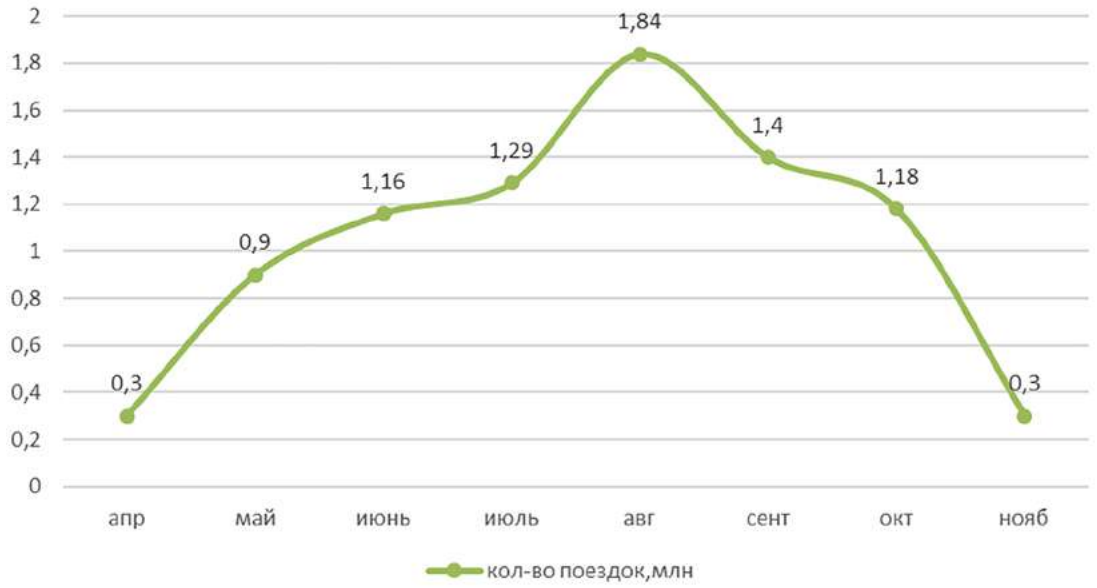



Рис. 7. Диаграмма распределения поездок по месяцам года

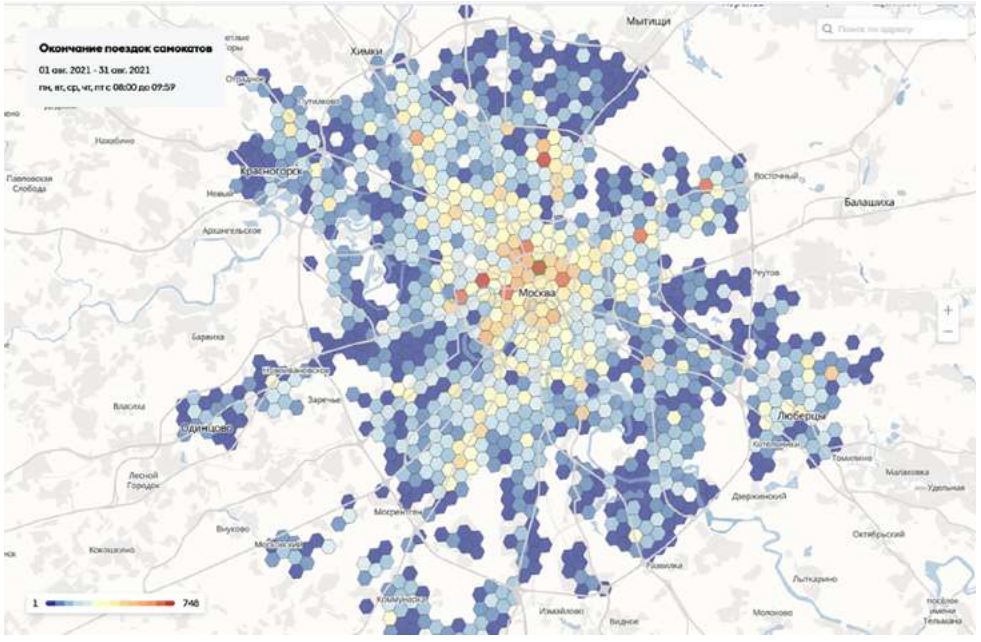



Рис. 8. Тепловая карта Москвы

увеличением пользователей в период отпусков. В весенние и осенние периоды года наблюдается сокращение количества поездок по отношению к летнему периоду, в первую очередь это может быть объяснено погодными условиями, так как пользователям было намного безопаснее и комфортнее воспользоваться услугами общественного транспорта. В среднем за сутки в августе пользователям были доступны 18 тыс. самокатов, при этом в течение дня 8 самокатов из 10 были в аренде. На рис. 7 представлена диаграмма распределения поездок по месяцам года.

Аналитиками Центра организации дорожного движения Москвы была составлена тепловая карта, показывающая плотность распределения поездок в течение дня: чем насыщеннее и теплее цвет карты, тем больше поездок заканчивалось в

Рис. 9. Фрагмент тепловой карты

этом сегменте [3]. На рис. 8 представлена тепловая карта Москвы, на которой наглядно видно распределение заказов на использование самокатами.

На основании тепловой карты, полученной в результате проведенного исследования, можно сделать вывод о том, что самокаты становятся частью мультимодальных маршрутов — тех, в которых используются разные транспортные средства, причем как на начальном или конечном отрезке пути в отдельности, так и пользователь может использовать эти сервисы и в начале, и в конце своего пути.

Наибольшей популярностью прокат самокатов пользовался в непосредственной близости расположения метро, так как пользователи предпочитали воспользоваться услугой проката чтобы добраться до станции и от станции до конечной точки своего маршрута. На рис. 9 представлен фрагмент тепловой карты, показывающий сегмент с наибольшим спросом на услуги проката самокатов.

Еще одной технологией, способной обеспечить потребность пользователей в перемещении в городских условиях, является услуга проката велосипедов, или байкшеринг.

Байкшеринг (англ. *bikesharing* — переводится как «совместное использование велосипедом») — это услуга мобильности, которая основана на краткосрочном доступе к арендованным велосипедам по мере необходимости.

В условиях высокой автомобилизации городов велопрокат рассматривается как неотъемлемая часть городской транспортной инфраструктуры и служит дополнением к общественному транспорту, который становится все более популярным во всем мире. На сегодняшний день насчитывается более 1600 провайдеров, предлагающих в общей сложности 18 миллионов велосипедов для совместного использования, в то время как в 2005 году в мире было всего 17 велосервисов. На рис. 10 проиллюстрирована схема глобальной экспансии систем совместного использования велосипедов [4].

В России первым городом, который запустил систему прокатов велосипедов, стала Москва, реализация пилотного проекта началась в 2013 году. За первый год реализации программы сервисом прокатов велосипедов воспользовалось

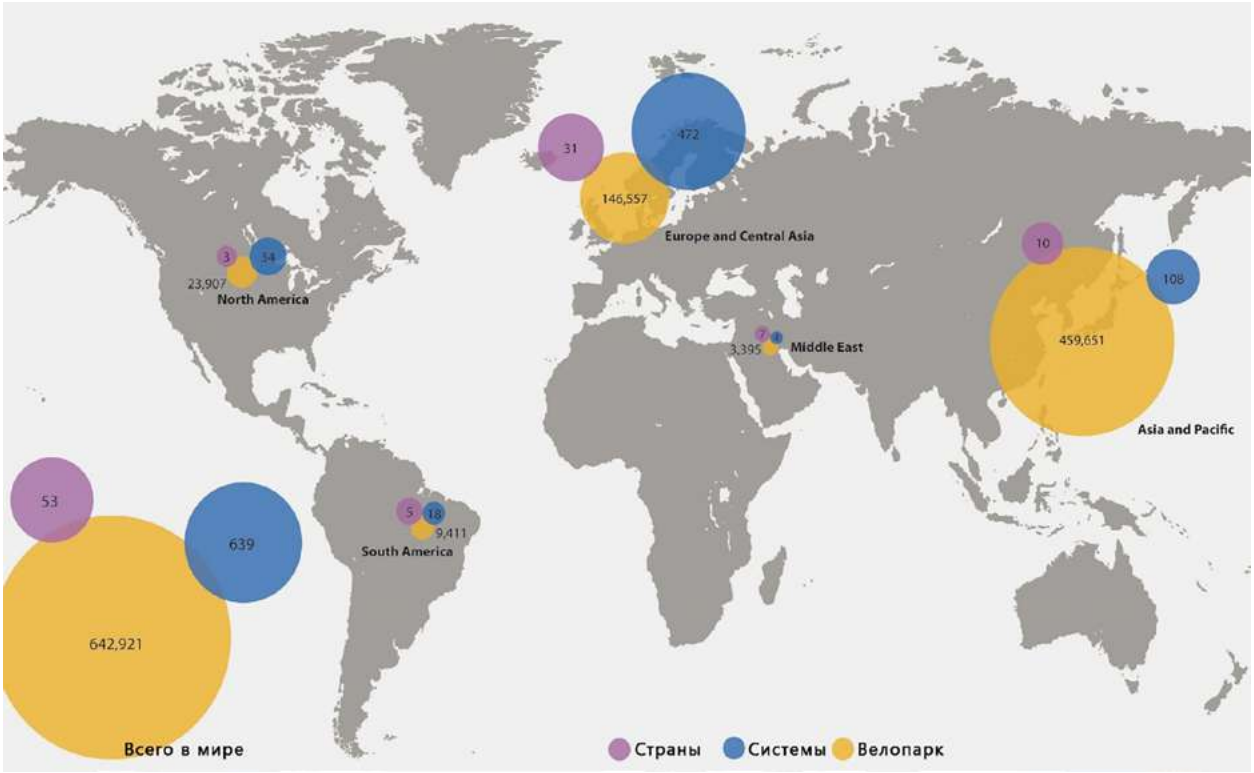



Рис. 10. Схема глобальной экспансии систем совместного использования велосипедов

больше 64 тыс. человек, но уже к 2015 году количество пользователей увеличилось в 7 раз. Велосипедная инфраструктура в Москве создавалась с нуля, но уже к 2015 году общая протяженность велодорожек в Москве составила 250 км, что позволило в значительной степени повысить безопасность участников движения [3].

На сегодняшний день в столице насчитывается более 773 км велодорожек, 700 станций проката и 7000 велосипедов. Значительное увеличение велодорожек и в целом развитие велоинфструктуры способствовало тому, в среднем по столице приходится более 6,1 поездки на один велосипед в сутки, что более чем в 2 раза больше, чем в Лондоне — одном из городов — лидеров по популярности велопроката — в британской столице на один велосипед в среднем приходится 2,6 поездки. Такие показатели означают, что пользователи стали пересаживаться на велосипед с целью совершения целевых поездок, а не просто для проведения досуга. На рис. 11 представлена карта велодорожек Москвы, на рис. 12 представлена карта станций проката велосипедов.

Новые услуги мобильности меняют транспортный сектор, либо предоставляя совершенно новые мобильные решения, либо изменение традиционных транспортных средств с помощью внедрения прогрессивных методов управления городскими транспортными потоками [5].

## Выводы

В заключение хотелось бы отметить, что рост новых услуг сервиса «Мобильность как услуга» был связан с сокращением использования личных автомобилей и увеличением использования общественного транспорта. В целом новые услуги мобильности заменяют большее количество поездок на личном транспорте, чем на общественном.

1. Рассмотренные концепции, такие как кикшеринг, байкшеринг, каршеринг, не выполняют такие же цели, как личное транспортное сред-

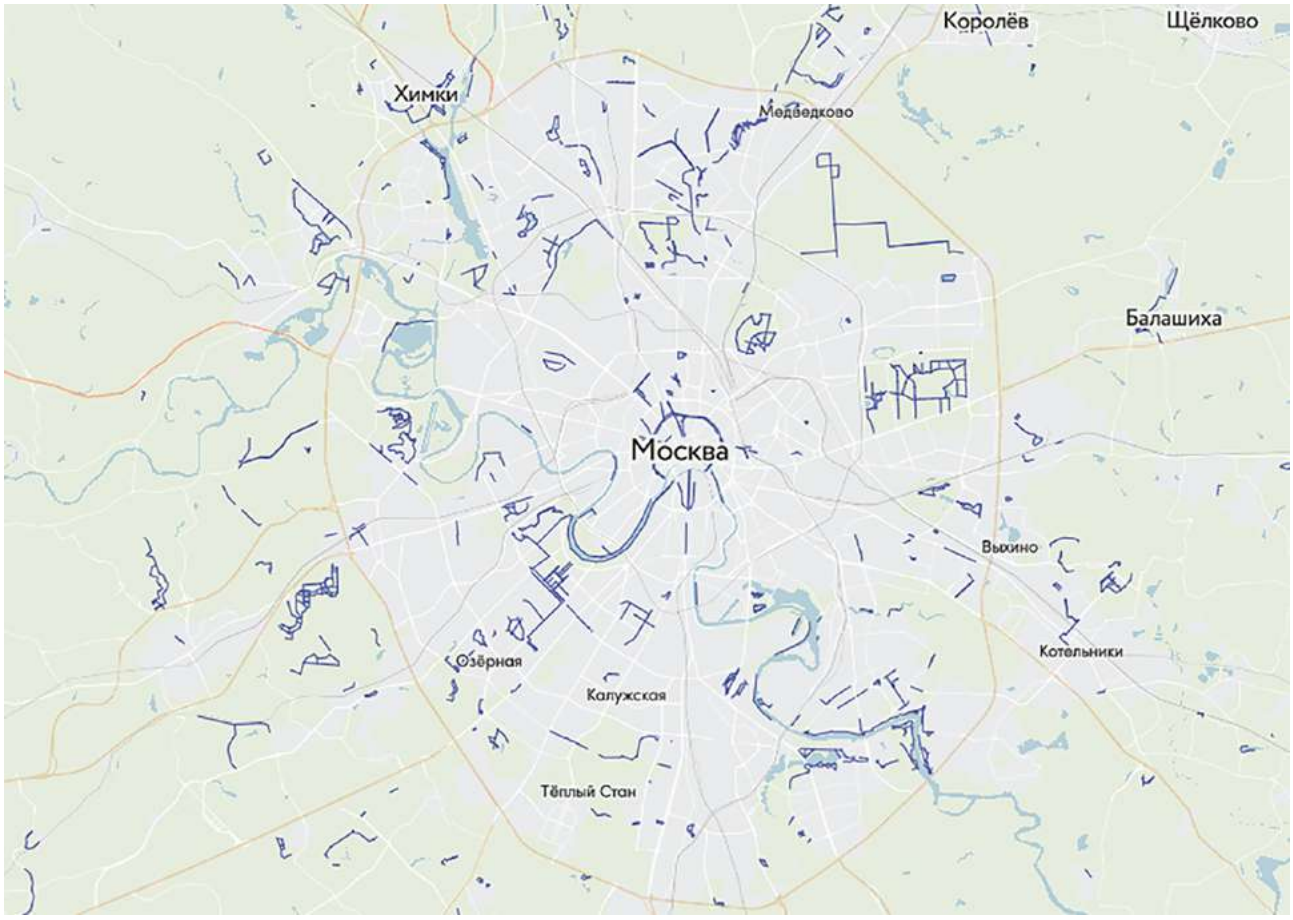



Рис. 11. Карта велодорожек Москвы

Рис. 12. Карта станций проката

ство или общественный транспорт; они лишь частично дополняют. Системы прокатов способны решить проблему «первой и последней мили», которая связанна с доступом к общественному транспорту или перемещениями внутри района.

2. Услуги же сервиса «Мобильность как услуга», как правило, используются в сочетании с общественным транспортом, так как они позволяют расширить зону охвата общественного транспорта и в целом обеспечить большую связанность транспортной сети городов в результате развития мультимодальных поездок.

## Заключение

На сегодняшний день основной проблемой и сложностью при реализации сервиса «Мобильность как услуга» является то, что все системы транспорта, включая общественный транспорт и сервисы проката, представлены отдельными сегментами спроса, а не являются частями единой системы. Решением данной проблемы может стать интеграция всех существующих транспортных систем в единую систему, способную в большей степени повлиять на эффективность мобильности пользователей городов.

## Библиографический список

1. Аналитическая записка UITP: Готовы к MaaS — Легче мобильность для граждан и лучше данные по городам. URL: https://www.uitp.org/publications/better-urban-mobility-playbook/ (дата обращения: 23.11.2022).

2. Бурмистров А. Н. Управление транспортными потоками: монография / А. Н Бурмистров, А.И. Солодкий. — М.: Инфара-М, 2019. — 207 с.

3. Официальный сайт Центра организации дорожного движения Москвы. URL:https://i.transport.mos.ru/flyover (дата обращения: 30.11.2022).

4. Официальный сайт Московского велопроката. URL: https://velobike.ru (дата обращения: 30.11.2022).

5. Рекомендации по ориентированному на пользователя подходу к MaaS. URL: https://maas-alliance.eu/homepage/what-is-maas/ (дата обращения: 01.12.2022).

Дата поступления: 28.04.2023
Решение о публикации: 14.05.2023

**Контактная информация:**
СЛОБОДЧИКОВ Николай Александрович — канд. воен. наук, проф.; kola_slob@mail.ru
ДЕРГАЧЕВ Алексей Иванович — канд. воен. наук, доц.; d_ader@mail.ru
КУРАНОВА Ольга Николаевна — канд. техн. наук; olga_kuranova@mail.ru

# Prospective Development of New Service Offerings in the Urban Traffic Flow

**N. A. Slobodchikov, A. I. Dergachev, O. N. Kuranova**

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

**For citation:** Slobodchikov N. A., Dergachev A. I., Kuranova O. N. Prospective Development of New Service Offerings in the Urban Traffic Flow // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 279–289. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-279-289

## Summary

**Purpose**: One of the possible solutions to the problem of congestion of the road network in conditions of a high level of motorization of cities is considered. **Methods**: The concept of the service “Mobility as a service” as one of the progressive methods of urban traffic management is described. The technologies that allow this

service to work, while increasing the efficiency of the use of vehicles, are considered. **Results**: The analysis of carsharing, kicksharing and bikesharing services as a “first and last mile” transport system was carried out. **Practical significance**: The solution to this problem can be the integration of all existing transport systems into a single system that can have a greater impact on the efficiency of mobility of urban users.

**Keywords:** Mobility as a service, urban transport, public transport, rental system, carsharing, kicksharing, bikesharing, first and last mile transport.

## References

1. *Analiticheskaya zapiska UITP: Gotovy k MaaS — Legche mobil’nost’ dlya grazhdan i luchshe dannye po gorodam* [UITP Analytical Note: Ready for MaaS — Easier mobility for citizens and better data on cities]. Available at: https://www.uitp.org/publications/better-urban-mobility-playbook (accessed: November 23, 2022). (In Russian)

2. Burmistrov A. N., Solodky A. I. *Upravlenie transportnymi potokami: monografiya* [Traffic flow management: monograph] Moscow: Infara-M Publ., 2019, 207 p. (In Russian)

3. *Ofitsial’nyy sayt Tsentra organizatsii dorozhnogo dvizheniya Moskvy* [Official website of the Center for the organization of traffic in Moscow]. Available at: https://i.transport.mos.ru/flyover (accessed: November 30, 2022). (In Russian)

4. *Ofitsial’nyy sayt Moskovskogo veloprokata* [The official website of the Moscow bike rental]. Available at: https://velobike.ru (accessed: November 30, 2022). (In Russian)

5. *Rekomendatsii po orientirovannomu na pol’zovatelya podkhodu k MaaS* [Recommendations for a user-oriented approach to MaaS]. Available at: https://maas-alliance.eu/homepage/what-is-maas / (accessed: December 01, 2022). (In Russian)

Received: April 28, 2023
Accepted: May 14, 2023

**Author’s information:**
Nikolay A. SLOBODCHIKOV — PhD in Military Sciences, Associate Professor; kola_slob@mail.ru
Aleksey I. DERGACHEV — PhD in Military Sciences, Associate Professor; d_ader@mail.ru
Olga N. KURANOVA — PhD in Engineering; olga_kuranova@mail.ru

УДК 656.2

# Особенности управления местной работой на железнодорожных участках, обслуживающих прямые отправительские маршруты

**Г. И. Паламарчук[1], В. Н. Кузьменкова[2], А. А. Фомин[3], П. Ю. Либерман[4]**

[1]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
[2]Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, Российская Федерация, 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Суворовская, 1
[3]Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8
[4]Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Российская Федерация, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

**Для цитирования:** *Паламарчук Г. И., Кузьменкова В. Н., Фомин А. А., Либерман П. Ю.* Особенности управления местной работой на железнодорожных участках, обслуживающих прямые отправительские маршруты // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 290–301. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-290-301

## Аннотация

**Цель:** Применяя имитационное моделирование, изучить особенности взаимосвязей технологий обработки маршрутов и пропуска поездов на станциях погрузки (выгрузки) и прилегающих к ним перегонах и обосновать необходимые параметры и коэффициенты для отражения этих взаимосвязей в методике комплексной оценки возможностей железнодорожных участков в целом. **Методы:** Прогнозирование объемов поездной, грузовой и маневровой работы железнодорожных участков, на которых планируется обслуживать полносоставные маршруты. **Результаты:** Разработать имитационную модель функционирования железнодорожного участка района погрузки (выгрузки) в целом. **Практическая значимость:** Имитационная модель эффективна в ходе оперативного планирования поездной работы диспетчерами участка.

**Ключевые слова:** Парк грузовых вагонов, инфраструктура железнодорожного транспорта, перевозочный процесс, пропускная способность, имитационное моделирование.

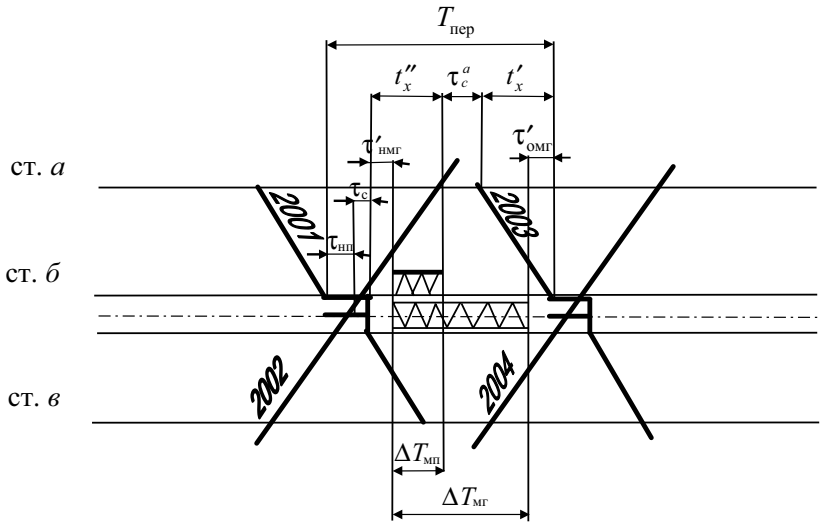
## Введение

Для железнодорожных участков районов погрузки (выгрузки) грузовых поездов разных приоритетов характерным является необходимость обслуживания прямых отправительских маршрутов, что вызывает резкое возрастание объема и изменение характера местной работы. В ее структуре преобладает погрузка (выгрузка) полносоставных поездов на отдельных станциях участка.

В практической работе железнодорожных участков, используемых для погрузки и выгрузки, также возникают конфликтные ситуации при организации транспортного процесса.

Они обусловлены влиянием обрабатываемого приоритетного поездопотока на поезда, пропускаемые по участку из-за неготовности его технической базы к изолированному выполнению технологических операций.

На большинстве станций погрузки (выгрузки) для конфликтных ситуаций характерны признаки устойчивых технологических связей. Все это свидетельствует о целесообразности использовать




Условные обозначения:

— бюджет времени для производства маневровых операций с выходом на прилегающий перегон;

— бюджет времени для производства маневровых операций с выездом на главный путь и занятием горловины станции.

Рис. 1. Вариант пропуска поездов при парном параллельном непакетном графике движения поездов

концепцию логистики применительно к транспортным потокам [1].

В этих условиях возникает необходимость заблаговременного прогнозирования объемов поездной и грузовой работы железнодорожных участков, на которых планируется обслуживать полносоставные маршруты [2, 3].

Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации (ст. 7) [4] определяет приоритетный характер их обслуживания. Такой подход позволит рационально организовать взаимодействие всех элементов железнодорожного участка, согласовать интересы различных поездопотоков в зависимости от оперативно-тыловой и транспортной обстановки, найти взаимоприемлемые и взаимовыгодные решения.

В конечном результате данные мероприятия смогут повысить эффективность использования технической базы железнодорожного участка.

Возможности грамотной работы станций погрузки (выгрузки) при пропуске поездов и выполнении технологических операций по обработке воинских эшелонов определяются состоянием технической базы этих станций, а также порядком пропуска поездов по станции и прилегающим к ней перегонам (рис. 1).

При этом бюджет времени для производства маневров с выходом на главный путь и занятием горловины станции ($\Delta T_{мг}$) устанавливается по формуле:

$$\Delta T_{мг} = T_{пер} - (\tau_с + \tau_{нп} + \tau'_{нмг} + \tau'_{омг}) \text{ мин}, \quad (1)$$

где $T_{пер}$ — период графика;

$\tau_с$ — интервал скрещения поездов;

$\tau_{нп}$ — интервал неодновременного прибытия поездов;

$\tau'_{нмг}$ — интервал времени по освобождению и подготовке маршрута для выполнения маневров в нечетной горловине станции;

$\tau'_{омг}$ — интервал времени по освобождению маршрута и окончанию маневров в нечетной горловине станции.

Рис. 2. Организация поездной и грузовой работы станции выгрузки при парном непакетном графике движения поездов

Бюджет времени для выполнения маневровых операций с выходом на перегон ($\Delta T_{мп}$) составит:

$$\Delta T_{мп} = T_{пер} - (\tau_{нп} + \tau^a_с + \tau'_{нмг} + \tau^a_с + t'_х), \text{ мин.} \quad (2)$$

где $\tau^a_с$ — интервал скрещения поездов по станции *а*;

$t'_х$ — время хода нечетного поезда по перегону.

Суммарный суточный бюджет времени использования главного пути и горловины станции, а также прилегающего перегона для производства маневровых операций при погрузке (выгрузке) может быть установлен по формулам:

$$\sum T_{мг} = \frac{1440}{T_{пер}} \cdot \Delta T_{мг}, \text{ мин.} \quad (3)$$

$$\sum T_{мп} = \frac{1440}{T_{пер}} \cdot \Delta T_{мп}, \text{ мин.} \quad (4)$$

Приоритетное выполнение операций по обработке грузовых поездов с выездом на прилегающий перегон (рис. 2) приведет к снижению его пропускной способности. В частности, потребуется снятие или перенос ниток отдельных поездов (поезда № 2005, 2006, 2009).

Представленные графико-аналитические расчеты подтверждают наличие взаимосвязей между погрузочно-выгрузочной способностью станций и пропускной способностью прилегающих к ним перегонов. Однако сложности протекающих процессов и большое число влияющих факторов, которые необходимо учитывать, не позволяют получить в полном объеме статистический материал для обоснования показателей взаимовлияния.

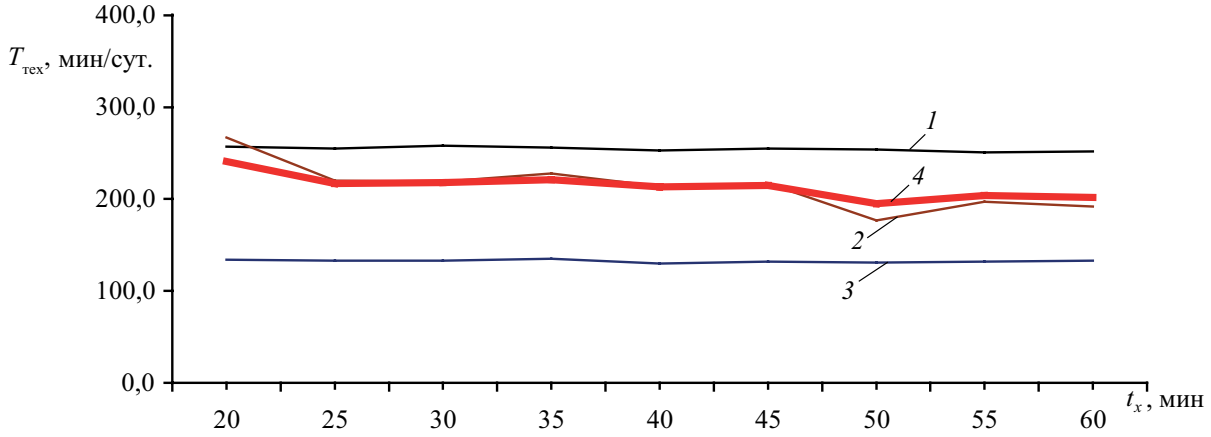



Рис. 3. Зависимость значения мощности перегона, используемой для обработки маршрутов $T_{тех}$, от времени хода поездов по перегону. Маршруты: *1* — с гусеничными машинами; *2* — с колесными машинами; *3* — с громоздкой, длинномерной техникой; *4* — среднее время $T_{тех}$ для станций района погрузки

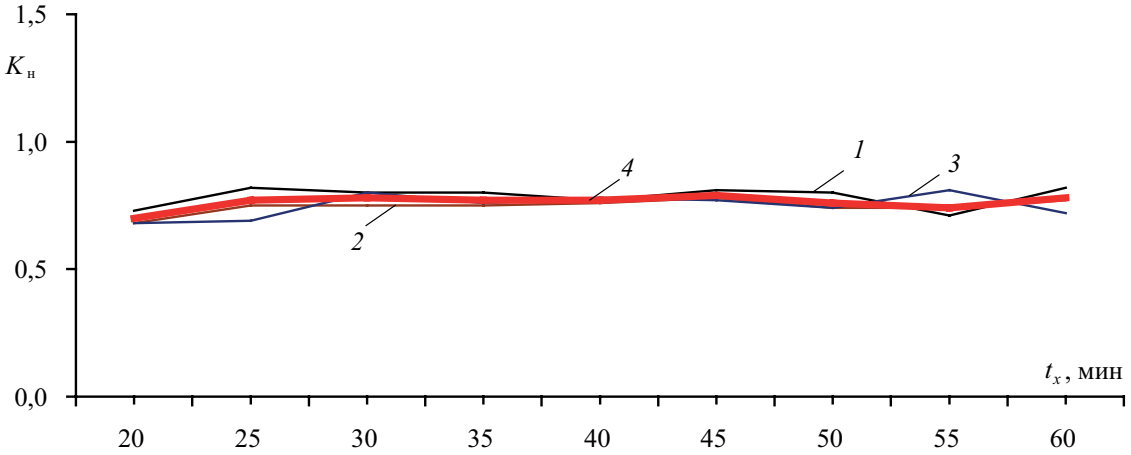



Рис. 4. Зависимость значения коэффициента $K_н$, учитывающего неполное использование погрузочно-выгрузочного места от времени следования поездов по перегону. Маршруты: *1* — с гусеничными машинами; 2 — с колесными машинами; *3* — с громоздкой, длинномерной техникой; *4* — среднее значение $K_н$ для станций района выгрузки

Решить данную проблему можно методом имитационного моделирования на электронно-вычислительных машинах станционных процессов с различной степенью их детализации. При этом был собран статистический материал по интересующим параметрам процессов.

Таким образом, формализация исследуемого процесса заключалась в расчленении на элементарные опыты, между которыми установились взаимосвязи, существующие в реальном процессе [5, 6].

Влияние технологических операций по обработке маршрутов [7] на пропускную способность перегонов, прилегающих к станциям погрузки, признано целесообразным оценивать значением времени использования мощности этих перегонов в течение суток для обработки поездов ($T_{тех}$). В частном случае характер зависимости $T_{тех}$ от времени продвижения поездов по перегону, прилегающему к станции погрузки, при приоритете операций на обработке маршрутов, представлен на рис. 3.

Рекомендуемые значения $T_{тех}$ для комплексной оценки пропускной способности железнодорожных участков получены для различных режимов.

Влияние неравномерного прибытия (отправления) маршрутов на время использования погрузочно-выгрузочного места целесообразно отражать с помощью коэффициента $K_н$.

Его значения поставлены в зависимость от времени хода поездов по прилегающему к станции погрузки (выгрузки) перегона и режима работы железнодорожного участка в целом.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента неравномерности $K_н$ от времени следования поездов по перегону, прилегающему к станции выгрузки при преимуществе выполнения маневровой работы.

В рассматриваемом случае коэффициент $K_н$ может принимать значения 0,7–0,78. Для станций погрузки $K_н$ = 0,63–0,69. При преимуществе поездной работы на участке неравномерность подвода маршрутов снижает возможности станций по погрузке (выгрузке). $K_н$ может принимать значения 0,22–0,67.

Конкретные значения коэффициента неравномерности в зависимости от времени хода поездов по прилегающим перегонам к станциям погрузки и выгрузки получены для различных режимов.

В ряде случаев при выполнении перевозок по жестким расписаниям (детерминированный подвод) эффективность использования погрузочно-выгрузочных мест несколько возрастает. Однако и в этих случаях может иметь место неполное использование погрузочно-выгрузочного места (ПВМ).

Это обусловлено требованиями безопасности перевозок, в соответствии с которыми на станциях погрузки (выгрузки) должен находиться только один маршрут [8].

Очередной состав, при условии детерминированного подвода, должен находиться на соседней станции. Недоиспользование ПВМ обусловлено ожиданием подвода поезда ($t_x$).

В этом случае неполное использование погрузочно-выгрузочного места целесообразно также рассматривать для двух режимов работы участка: при приоритете поездной работы на участке с использованием коэффициента $K_н$ и при приоритете переработки маршрутов на станциях погрузки (выгрузки) с использованием коэффициента $K_{гр}$.

Характер зависимости названных коэффициентов для станций выгрузки от времени хода поездов по прилегающему перегону представлен на рис. 5, 6.

В результате имитационного моделирования признано целесообразным внести коррективы и в методику расчета времени занятия погрузочно-выгрузочного места ($t_{зан}$) при обработке одного маршрута.

Как известно, количество маневровых операций (подач) под погрузку (выгрузку) $a$ влияет не только на продолжительность уборки групп вагонов ($t_1 + t_5$), но и оказывает влияние на общее время ожидания погрузки ($t_2$) и уборки ($t_4$) всеми группами $a$ вагонов.

Таким образом, время на погрузку (выгрузку) маршрута ($t_3$) также зависит от количества подач ($a$). В связи с этим признано целесообразным рассчитывать общее время занятия погрузочно-выгрузочного места с учетом обработки маршрута в одну подачу. В дальнейшем производится его корректировка, используя коэффициент $K_a$, зависящий от количества подач в составе поезда. В результате общее время занятия погрузочно-выгрузочного места при поступлении маршрута в переработку составит:

$$t_{зан} = K_a \left(t_1 + t_2 + bt_3 + t_4 + t_5\right), \text{ мин.} \quad (5)$$

Зависимость значений поправочного коэффициента $K_a$ с учетом количества подач в составе поезда при детерминированном подводе марш-

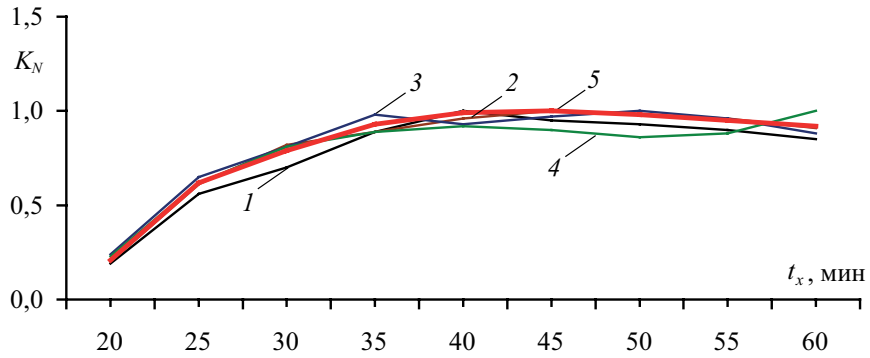



Рис. 5. Зависимость значения коэффициента $K_N$, учитывающего неполное использование погрузочно-выгрузочного места из-за приоритета выполнения поездной работы на станции выгрузки маршрута.
Маршруты: *1* — с гусеничными машинами; *2* — с колесными машинами; *3* — с громоздкой, длинномерной техникой; *4* — при крановой погрузке; *5* — среднее значение $K_N$ для станций района выгрузки

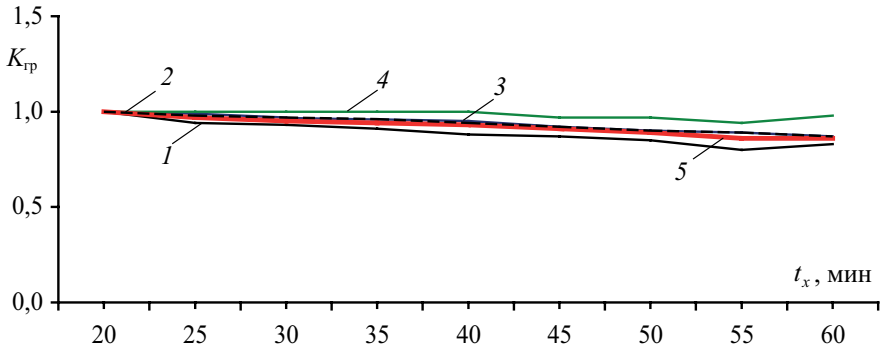



Рис. 6. Зависимость значения коэффициента $K_{гр}$, учитывающего неполное использование погрузочно-выгрузочного места при приоритете выполнения грузовой работы на станции маршрута.
Маршруты: *1* — с гусеничными машинами; *2* — с колесными машинами; *3* — с громоздкой, длинномерной техникой; *4* — при крановой погрузке; *5* — среднее значение $K_{гр}$ для станций района погрузки

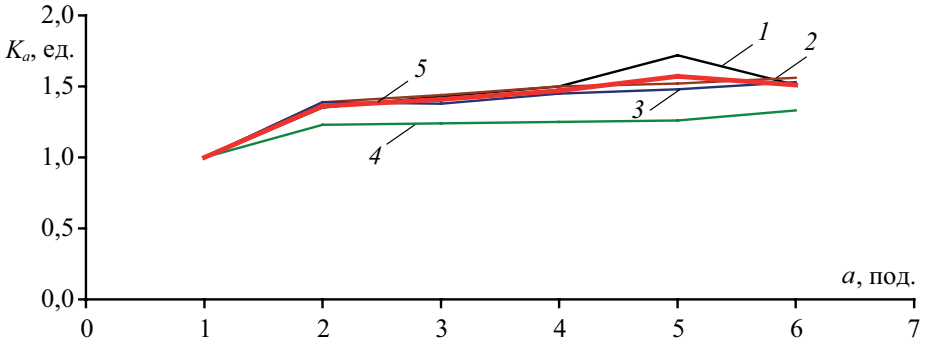



Рис. 7. Зависимость значения коэффициента $K_a$, учитывающего увеличение времени на обработку маршрута при его подаче под выгрузку по частям, от количества подач.
Маршруты: *1* — с гусеничными машинами; *2* — с колесными машинами; *3* — с громоздкой, длинномерной техникой; *4* — при крановой погрузке; *5* — среднее значение $K_a$ для станций района погрузки

рутов и приоритетном выполнении маневровой работы представлена на рис. 7.

Резюмируя сказанное ранее, можно сделать вывод о значении имитационного моделирования при изучении вида взаимосвязей технологий обработки маршрутов и пропуска поездов на станциях погрузки (выгрузки) и прилегающих к ним перегонах. Если принять во внимание текущую обстановку и лимитированные технические возможности участков железной дороги, то нужно определить очередность выполнения задач.

Исходя из складывающейся оперативной и тыловой обстановки, а также ограниченные, в ряде случаев, технические возможности железнодорожных участков требуют установления приоритетности при выполнении возлагаемых функций и, соответственно, комплексной оценки их возможностей. Блок-схема методики оценки представлена на рис. 8.

Начальный этап заключается в оценке пропускной способности железнодорожного участка (рис. 8) в двух режимах функционирования:

– при приоритете выполнения поездной работы железнодорожного участка;

– при приоритете выполнения грузовой и маневровой работы станций погрузки (выгрузки) железнодорожного участка погрузочно-выгрузочного района.

Период графика ограничивающего перегона при заданном времени хода поездов и определенных станционных интервалах может принимать различные значения в зависимости от порядка пропуска поездов через раздельные пункты (рис. 9).

Пропуск поездов по схеме, при которой период графика минимальный, принимается в качестве расчетной для определения пропускной способности.

Необходимо отметить, что период графика на двухпутных участках — на линиях с автоблокировкой (интервал между поездами), а на линиях с полуавтоматической блокировкой — время занятия перегона одним поездом (станционный интервал попутного следования).

Второй этап при приоритете выполнения грузовой и маневровой работы станций погрузки (выгрузки) на участке, пропускная способность отдельных перегонов, прилегающих к этим станциям, может быть снижена из-за необходимости использования мощности перегонов для производства маневров $T_{\text{тех}}$. В рассматриваемом режиме такие перегоны могут явиться ограничивающими для пропуска поездов. В связи с этим производится проверка всех перегонов с учетом времени $T_{\text{тех}}$ в различных вариантах подвода поездов под погрузку (выгрузку).

Аналогичный подход имеет место и в расчетах погрузочно-выгрузочной способности станций на железнодорожном участке ПВР. Все значения поправочных коэффициентов, учитывающие неполное, полное использование погрузочно-выгрузочного места в различных условиях подвода поездов $\left(K_{\text{н}}, K_N, K_{\text{гр}}\right)$.

Предлагаемая методика позволяет комплексно оценить на первом этапе пропускную ($N$), а на втором этапе погрузочно-выгрузочную способность участка ($E_{\text{уч}}$) в заданном режиме функционирования и при соответствующем порядке подвода грузовых поездов разных приоритетов (порожних составов). Данная методика применима для повышения эффективности работы диспетчеров участка [9, 10].

Моменты прибытия, отправления и проследования поездов различных категорий, определяемые графиком движения, являлись отправными точками для установления зон «безопасности» поездной работы в горловинах станций и на прилегающих перегонах [7, 11, 12].

В результате приходим к выводу, что порядок разрешения «конфликтных» ситуаций осуществлялся на основе установления приоритетности обслуживания заявок, поступивших в систему.

**1-й этап**

| | |
|---|---|
| 1. Рассчитывается пропускная способность по всем перегонам железнодорожного участка при приоритете поездной работы. | $N = \frac{1440}{T_{\text{пер}}} K$, п-в / сут. |
| 2. Устанавливаются ограничивающий перегон на участке и пропускная способность железнодорожного участка при приоритете поездной работы. | $N_{\text{н}} = \frac{1440}{T_{\text{пер}}} \alpha_{\text{н}} K$, п-в / сут. |
| 3. Рассматриваются перегоны, прилегающие к станциям погрузки (выгрузки), и рассчитывается их пропускная способность при приоритете выполнения операций по обработке маршрутов и принятом порядке их подвода (детерминированный или неравномерный подвод). | $N_E = \frac{1440 - T_{\text{тех}}}{T_{\text{пер}}} K$, п-в/сут. |
| 4. Устанавливаются ограничивающий перегон на участке и пропускная способность участка при приоритете выполнения операций по обработке маршрутов для соответствующего порядка их подвода. | $N_{\text{н}} = \frac{1440 - T_{\text{тех}}}{T_{\text{пер}}} \alpha_{\text{н}} K$, п-в/сут. |

**2-й этап**

| | |
|---|---|
| 5. Рассчитывается погрузочно-выгрузочная способность станций при приоритете вы-полнения операций грузовой и маневровой работы для соответствующего порядка подвода маршрутов. | $E_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{п(в)}} K_{\text{н}} \left(K_{\text{гр}}\right)}{K_a t_{\text{зан}}}$, п-в/сут. |
| 6. Определяется погрузочно-выгрузочная способность участка при приоритете выполнения операций по обработке маршрутов на станциях погрузки (выгрузки). | $E_{\text{уч}} = \sum_{1}^{n} E_{\text{ст}} K_{\text{рез}}$, п-в/сут. |
| 7. Рассчитывается погрузочно-выгрузочная способность станций погрузки (выгрузки) при приоритете поездной работы для соответствующего порядка подвода маршрутов. | $E_{\text{ст}(N)} = \frac{T_{\text{п(в)}} K_N K_{\text{н}} \left(K_{\text{гр}}\right)}{K_a t_{\text{зан}}}$, п-в/сут. |
| 8. Определяется погрузочно-выгрузочная способность участка при приоритете поездной работы. | $E_{\text{уч}(N)} = \sum_{1}^{n} E_{\text{ст}(N)} K_{\text{рез}}$, п-в/сут. |
| 9. Оценивается пропускная ($N$) и погрузочно-выгрузочная способность участка ($E_{\text{уч}}$) в заданном режиме функционирования и при соответствующем порядке маршрутов. | |

Рис. 8. Блок-схема методики комплексной оценки пропускной и погрузочно-выгрузочной способности железнодорожного участка, обслуживающего отправительские маршруты

Возможны четыре варианта пропуска:

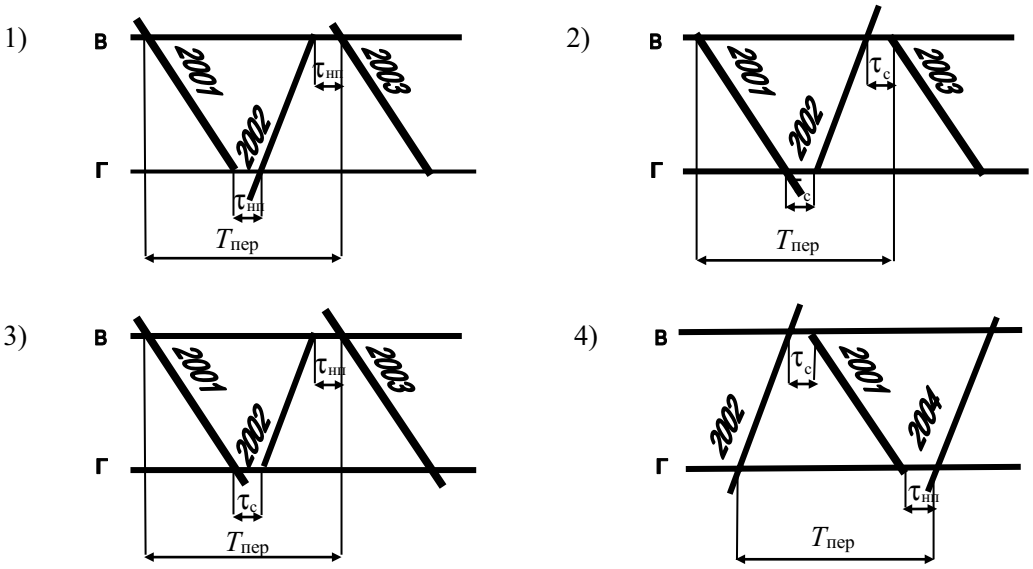



Рис. 9. Схемы пропуска поездов по ограничивающему перегону

Можно предложить способы выхода из «конфликтных» ситуаций:

1) предоставление преимущества пропуску поездов — в данном случае происходят задержки маневровых операций при обработке маршрутов. В результате время нахождения маршрутов под погрузкой (выгрузкой) будет увеличено на суммарную величину этих задержек;

2) обеспечение приоритета погрузке (выгрузке) маршрутов.

## Заключение

Исследованные способы моделирования поездной, грузовой и маневровой работы погрузки (выгрузки) маршрутов и прилегающих к ним перегонов, а также железнодорожных участков в целом могут стать основой для прогнозных моделей, что позволит установить характер взаимосвязей этих видов работ в различных режимах функционирования железнодорожных участков на время от 5 до 48 часов.

В результате была разработана и рекомендована для практического использования методика комплексной оценки пропускных и погрузочно-выгрузочных способностей железнодорожных участков погрузочно-выгрузочных районов.

Однако для возможности их использования необходимо обязательное включение соответствующей информации в разрабатываемую базу данных создаваемой комплексной автоматизированной системы управления местной работы (КАСУМР).

## Библиографический список

1. Инструкция по организации движения поездов и маневровой работы на железнодорожном транспорте Российской Федерации, утвержденная приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 23 июня 2022 г. № 250 (Приложение № 2 к Правилам технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации).

2. Паламарчук Г. И. Организация железнодорожных перевозок с использование приватного парка грузовых вагонов / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. Н. Кацер // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2021). — 2022. — С. 65–70.

3. Паламарчук Г. И. Методы и мероприятия устойчивости процессов функционирования железнодорожного

узла / Г. И. Паламарчук, А. А. Фомин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 528–536.

4. Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. № 503-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» и статью 2 Федерального закона «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации».

5. Паламарчук Г. И. Аспекты повышения конкурентоспособности логистических услуг российских предприятий / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, А. В. Дадаев // Russian Journal of Logistics & Transport Management. — 2020. — Т. 5. — № 1. — С. 19–27.

6. Кузьменкова В. Н. Особенности продвижения и сбыта инновационного продукта: маркетинговые и логистические аспекты / В. Н. Кузьменкова, А. Б. Красильников // Экономика и управление в сфере услуг: современное состояние и перспективы развития: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 3 февраля 2015 года. — СПб.: Санкт-Петербургский гуманитарный университет профсоюзов, 2015.

7. Паламарчук Г. И. Комплексный подход к оценке возможностей железнодорожных участков погрузочно-выгрузочных районов: монография / Г. И. Паламарчук. — СПб.: ВТУ ЖДВ РФ. — 2004. — С. 22–25.

8. Кузьменкова В. Н. Особенности маркетинга на транспорте / В. Н. Кузьменкова, Г. И. Паламарчук, Н. Н. Кацер // Специальная техника и технологии транспорта. — 2020. — № 7(45). — С. 215–219.

9. Кузьменкова В. Н. Особенности и правила перевозки грузов универсальными контейнерами при смешанном сообщении / В. Н. Кузьменкова, Г. И. Паламарчук, В. В. Поляков // Специальная техника и технологии транспорта. — 2022. — № 14. — С. 166–171.

10. Паламарчук Г. И. Сервисное обслуживание грузовых вагонов на основе контракта жизненного цикла / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. Н. Кацер // Специальная техника и технологии транспорта. — 2021. — № 9. — С. 97–103.

11. Паламарчук Г. И. Имитационное моделирование мультимодальной цепи / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. В. Малышев // Специальная техника и технологии транспорта. — 2019. — № 3(41). — С. 112–117.

12. Паламарчук Г. И. Порядок занятия инфраструктуры железнодорожного транспорта подвижным составом / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. В. Малышев // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике: сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2022 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. — СПб.: ООО «Медиапапир», 2022. — С. 194–198.

Дата поступления: 28.04.2023
Решение о публикации: 29.05.2023

**Контактная информация:**
ПАЛАМАРЧУК Геннадий Иванович — канд. техн. наук, доц.; palamarchuk.67@mail.ru
КУЗЬМЕНКОВА Вероника Николаевна — канд. экон. наук, доц.; veronicakuzmenkova@rambler.ru
ФОМИН Алексей Анатольевич — канд. техн. наук, доц.; aleksfsp@yandex.ru
ЛИБЕРМАН Павел Юрьевич — канд. экон. наук, доц.; pavellibe@yandex.ru

# Features of Managing Local Work on Railway Sections Serving Direct Outbound Routes

**G. I. Palamarchuk[1], V. N. Kuzmenkova[2], A. A. Fomin[3], P. Yu. Liberman[4]**

[1]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[2]Military Institute (Railway Troops and Military Communications) of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev, 1, Suvorovskaya str., Peterhof, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation
[3]Military Academy of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev, 8, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation
[4]Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, 38, Pilotov str., St. Petersburg, 196210, Russian Federation

**For citation:** Palamarchuk G. I., Kuzmenkova V. N., Fomin A. A., Liberman P. Yu. Features of Managing Local Work on Railway Sections Serving Direct Outbound Routes // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 290–301. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-290-301

**Summary**
**Purpose:** Using simulation modeling to investigate the nature of the interrelationships of technologies for processing routes and train throughput at loading (unloading) stations and adjacent stages, as well as for justifying the appropriate parameters and coefficients to reflect these interrelations in the methodology of a comprehensive assessment of the capabilities of railway sections as a whole. **Methods:** Forecasting the volume of train, freight and shunting work of railway sections where it is planned to serve full-composite routes. **Results:** To develop an imitation model of the functioning of the railway section of the loading (unloading) area as a whole. **Practical significance:** The simulation model can be successfully used in the course of operational planning of train work by section dispatchers.

**Keywords:** Freight car fleet, railway transport infrastructure, transportation process, throughput capacity, simulation modeling.

## References

1. *Instruktsiya po organizatsii dvizheniya poezdov i manevrovoy rabo-ty na zheleznodorozhnom transporte Rossiyskoy Federatsii, utverzhdennaya prikazom Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 23 iyunya 2022 g. № 250 (Prilozhenie № 2 k Pravilam tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii)* [Instructions for the organization of train traffic and shunting work on the railway transport of the Russian Federation, approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 № 250 (Appendix № 2 to the Rules for the Technical Operation of Railways of the Russian Federation)]. (In Russian)

2. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Katser N. N. Organizatsiya zheleznodorozhnykh perevozok s is-pol'zovanie privatnogo parka gruzovykh vagonov [Organization of railway transportation using a private fleet of freight cars]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (RILTTRANS-2021)* [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (RILTTRANS-2021)]. 2022, pp. 65–70. (In Russian)

3. Palamarchuk G. I., Fomin A. A. Metody i meropri-yatiya ustoychivosti protsessov funktsionirovaniya zhelez-nodorozhnogo uzla [Methods and measures for the stability of the processes of functioning of the railway junction]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 528–536. (In Russian)

4. *Federal'nyy zakon ot 31 dekabrya 2014 g. № 503-FZ "O vnesenii izmeneniy v Federal'nyy zakon "Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii" i stat'yu 2 Federal'nogo zakona "O zheleznodo-rozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law № 503-FZ of December 31, 2014 "On Amendments to the Federal Law "Charter of Railway Transport of the Russian Federation" and Article 2 of the Federal Law "On Railway Transport in the Russian Federation"]. (In Russian)

5. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Dadaev A. V. *Aspekty povysheniya konkurentosposobnosti lo-gisticheskikh uslug rossiyskikh predpriyatiy* [Aspects of improving the competitiveness of logistics services of Russian enterprises]. Russian Journal of Logistics & Transport Management, 2020, vol. 5, Iss. 1, pp. 19–27. (In Russian)

6. Kuz'menkova V. N., Krasil'nikov A. B. *Osobennosti prodvizheniya i sbyta innovatsion-nogo produkta: marketingovye i logisticheskie aspekty. Ekonomika i upravlenie v sfere uslug: sovre-mennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 3 fevralya 2015 goda* [Features of promotion and marketing of an innovative product: marketing and logistical aspects. Economics and management in the service sector: current state and development prospects: materials of the XII All-Russian scientific and practical conference, St. Petersburg, February 3, 2015]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gumanitarnyy universitet profsoyuzov Publ., 2015. (In Russian)

7. Palamarchuk G. I. *Kompleksnyy podkhod k otsenke vozmozhnostey zhe-leznodorozhnykh uchastkov pogruzochno-vygruzochnykh rayonov: monografiya* [An integrated approach to assessing the possibilities of railway sections of loading and unloading areas: monograph]. St. Petersburg: VTU ZhDV RF Publ., 2004, pp. 22–25. (In Russian)

8. Kuz'menkova V. N., Palamarchuk G. I., Katser N. N. Osobennosti marketinga na transporte [Features of marketing in transport]. *Spetsial'naya tekhnika i tekh-nologii transporta* [Special equipment and technologies of transport]. 2020, Iss. 7(45), pp. 215–219. (In Russian)

9. Kuz'menkova V. N., Palamarchuk G. I., Polyakov V. V. Osobennosti i pravila perevozki gruzov uni-versal'nymi konteynerami pri smeshannom soobshchenii [Peculiarities and rules of transportation of goods by universal containers in mixed traffic]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special technics and transport technologies]. 2022, Iss. 14, pp. 166–171. (In Russian)

10. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Katser N. N. Servisnoe obsluzhivanie gruzovykh vagonov na osnove kontrakta zhiznennogo tsikla [Service maintenance of freight cars based on the life cycle contract]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special equipment and transport technologies]. 2021, Iss. 9, pp. 97–103. (In Russian)

11. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Malyshev N. V. Imitatsionnoe modelirovanie mul'timodal'noy tsepi [Simulation of a multimodal circuit]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special technics and transport technologies]. 2019, Iss. 3(41), pp. 112–117. (In Russian)

12. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Malyshev N. V. *Poryadok zanyatiya infrastruktury zheleznodo-rozhnogo transporta podvizhnym sostavom. Analiz i prognozirovanie sistem upravleniya v promyshlennosti, na transporte i v logistike: sbornik trudov XXII Mezh-dunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, studentov i aspirantov, Cankt-Peterburg, 19–21 aprelya 2022 goda. Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I* [The procedure for occupying the infrastructure of railway transport with rolling stock. Analysis and forecasting of control systems in industry, transport and logistics: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Students and Postgraduates, St. Petersburg, April 19–21, 2022. Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Communications]. St. Petersburg: OOO "Mediapapir", 2022, pp. 194–198. (In Russian)

Received: April 28, 2023
Accepted: May 29, 2023

**Author's information:**
Gennady I. PALAMARCHUK — PhD in Engineering, Associate Professor; palamarchuk.67@mail.ru
Veronika N. KUZMENKOVA — PhD in Economics, Associate Professor
Alexey A. FOMIN — PhD in Engineering, Associate Professor; aleksfsp@yandex.ru
Pavel Yu. LIBERMAN — PhD in Economics, Associate Professor; pavellibe@yandex.ru

УДК 656.073

# Совершенствование грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте: концепция и инструментарий

**Ф. А. Смирнов, А. В. Новичихин, К. Е. Ковалев**

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

**Для цитирования:** *Смирнов Ф. А., Новичихин А. В., Ковалев К. Е.* Совершенствование грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте: концепция и инструментарий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 302–313. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-302-313

## Аннотация

**Цель:** В статье предложено решение проблемы низкой эффективности грузовой и коммерческой работы на железнодорожных станциях с небольшим объемом погрузки. Рассмотрены цели и задачи национального проекта «Цифровая экономика» и программы «Цифровая железная дорога». Обозначены методы совершенствования грузовой и коммерческой работы, применяемые в настоящее время на железнодорожном транспорте для повышения производительности работы станций и увеличения объема работы без капитальных вложений в инфраструктуру. Сформирован перспективный алгоритм обработки вагонов по отправлению. Предложена концепция совершенствования технологии приема вагона к перевозке. Разработана интеллектуальная система приема вагонов к перевозке с помощью нейронной сети. Показаны результаты разработки программы для определения типов подвижного состава на изображении. **Методы:** Применяются методы анализа, синтеза и нейронных сетей, теория автоматического управления. **Результаты:** Предложено решение проблемы повышения эффективности технологии приема вагонов к перевозке на станциях с незначительными объемами погрузки. **Практическая значимость:** Внедрение разработанной интеллектуальной системы на железнодорожных станциях позволит повысить качество и скорость проведения коммерческого осмотра при приеме вагона к перевозке.

**Ключевые слова:** Нейронная сеть, автоматизация коммерческого осмотра, грузовая и коммерческая работа, цифровизация, грузоотправитель, перевозчик, управление перевозками.

## Введение

В течение последних 20 лет объем погрузки грузов в компании ОАО «Российские железные дороги» находится на уровне 1200 млн т с незначительными колебаниями. Динамику можно увидеть на рис. 1, составленном на основании ежегодных финансовых отчетов компании [1]. При этом имеется тенденция к укрупнению погрузочных площадок и концентрации их в железнодорожных узлах, что предъявляет к инфраструктуре перевозчика более высокие требования. Одним из ключевых элементов перевозочного процесса является грузовая и коммерческая работа. От качества ее организации зависит как безопасность движения, так и удовлетворенность клиентов железнодорожного транспорта.

Методы организации грузовой и коммерческой работы за последние годы существенно изменились, в основном благодаря внедрению автоматизированных систем как документального сопровождения перевозки, так и непосредственного выполнения определенных операций. Несмотря на значительное повышение производительности работы станции, ключевым фактором процесса

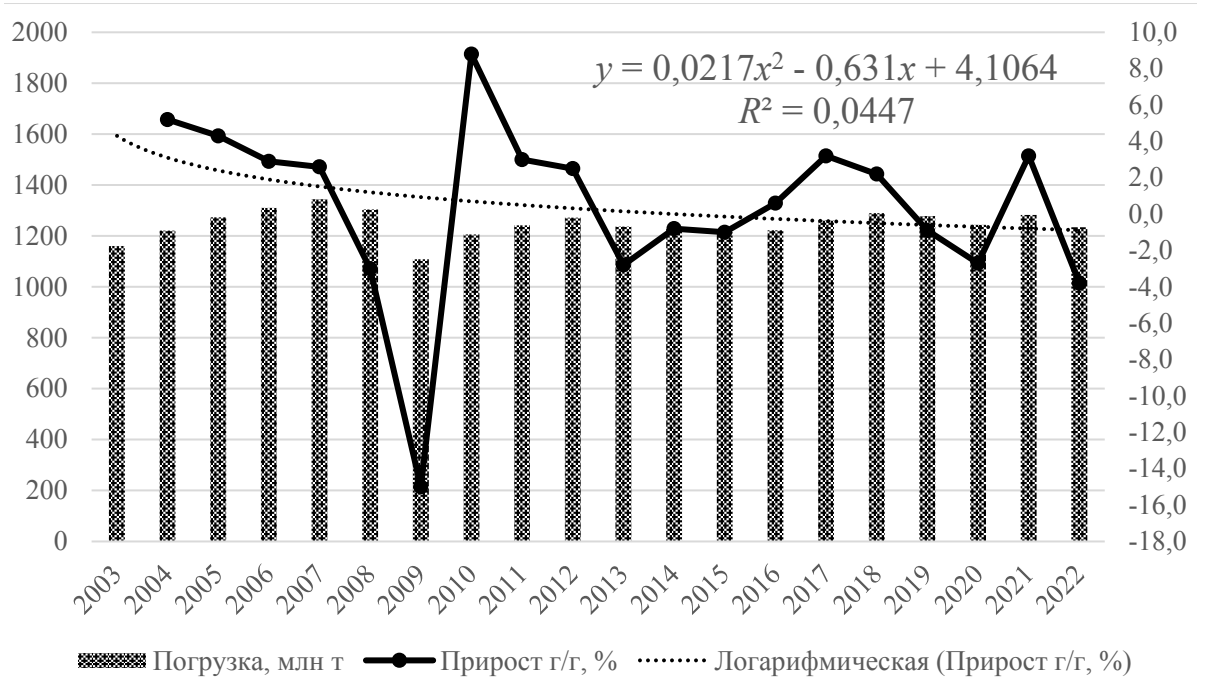



Рис. 1. Погрузка грузов в вагоны в компании ОАО «Российские железные дороги» в 2003–2022 гг.

остается человек. Именно он обрабатывает полученную из автоматизированных систем информацию и принимает конечное решение. Следующим шагом в области повышения качества грузовой и коммерческой работы должна стать цифровизация тех процессов, которые сегодня выполняет человек. Это можно достичь проектированием распределенной вычислительной системы с использованием нейронной сети.

Функция $y$ описывает логарифмическую линию тренда ежегодного изменения погрузки. Расчеты свидетельствуют об уменьшении амплитуды колебаний показателей к 2022 году. Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2$ показывает достоверность выполненных расчетов, в данном случае погрешность минимальна.

## Грузовая и коммерческая работа

Неотъемлемой частью перевозочного процесса является грузовая и коммерческая работа, она обеспечивает выполнение необходимых начально-конечных операций на всех видах транспорта, организует взаимодействие видов транспорта в местах их стыкования, а также перевозчиков с грузоотправителями и грузополучателями. На железнодорожном транспорте к области коммерческой работы относится контроль сохранности грузов и подвижного состава в пути следования.

От скорости и качества выполнения коммерческих операций зависит перерабатывающая способность станций и терминалов. Поэтому в первую очередь автоматизируют процессы, которые в большей степени зависят от человеческого фактора, — учет, контроль, внесение данных, статистика, отчетность и другие. Например, в области документооборота разработаны решения для грузоотправителей и грузополучателей, позволяющие создавать заявки и оплачивать услуги с одного АРМ через личные кабинеты автоматизированных систем, а также отслеживать местоположение груза и операции. Например, одним из перспективных инструментов является «Конструктор формирования услуг доставки грузов железнодорожным транспортом» [2]. Сервис предлагает гибкий подход в области оказания сопутствующих перевозке услуг.

В настоящее время в области грузовой и коммерческой работы наблюдаются интенсивные процессы по автоматизации и интеллектуализации. Темп изменений в транспортной отрасли задает национальный проект «Цифровая экономика», цели которого следующие:

– создание экосистемы цифровой экономики России, где цифровые данные являются основным носителем информации и ключевым фактором производства во всех отраслях;

– создание условий для развития институтов и инфраструктуры цифровых сервисов и цифровых данных;

– обеспечение конкурентоспособности российской экономики в условиях глобальной цифровизации [3].

В развитие национального проекта «Цифровая экономика» предлагается интеллектуальная система приема вагонов к перевозке, работа которой основана на технологии нейронных сетей. Задачи, решаемые этой системой, полностью коррелируют с приведенными выше целями, поэтому разработка имеет актуальность в настоящее время. Система станет ядром цифрового документооборота между перевозчиком и грузовладельцем. Она использует исключительно цифровые данные и не требует участия человека в их обработке.

## Современные методы автоматизации грузовой и коммерческой работы

На железнодорожном транспорте для цифровизации актово-претензионной работы разработана система «ЕАСАПР М» («Единая автоматизированная система актово-претензионной работы»), которая реализует в себе функции по автоматическому формированию необходимых документов на основании данных, вводимых работниками, и учету операций, относящихся к грузовой и коммерческой работе. Также в ней реализована возможность подписания электронных документов причастными сторонами перевозочного процесса.

Автоматизированные системы перевозчиков — АС «Этран», «Дорожная информационная логистическая система» — и иных стейкхолдеров транспортного рынка постоянно увеличивают степень интегрированности, что, например, позволяет центрам управления перевозками на железнодорожном транспорте отслеживать время подхода судов в порты, а исходя из этого формировать необходимые судовые партии и подводить их на железнодорожные станции в нужное время. Что позволяет наиболее эффективно использовать мощности станционных и перегрузочных устройств, а также вместимость прифронтовых складов.

Перевозчики на основании поданных заявок на перевозку грузов рассчитывают суточные объемы погрузки и планируют загрузку станционных устройств и эксплуатационную работу.

В области автоматизации работы транспортно-логистических терминалов применяются решения, которые позволяют вести учет прибывающих и отправляющихся контейнеров при движении подвижной единицы, через специальную рамку распознать номер контейнера и транспортного средства. Такие средства автоматизированного учета применяются на терминалах, где происходит стыкование автомобильного и железнодорожного транспорта, железнодорожного и водного, автомобильного и водного [4–6].

Предложенные решения в области автоматизации грузовой и коммерческой работы железнодорожных станций и логистических терминалов основаны на применении технологии нейронных сетей для распознавания и учета подвижного состава. В настоящее время решены задачи по распознаванию транспортных единиц в движении, инвентарных номеров и учету подвижного состава на объекте. Но такие системы

по-прежнему требуют участия человека при обработке информации и не представляют собой завершенной безлюдной технологии.

Предполагается, что следующими процессами, которые будут автоматизированы, являются прием груза к перевозке и выявление коммерческих неисправностей.

Рассмотрим отечественные разработки по автоматизации грузовой и коммерческой работы на железных дорогах России, ввиду того что 44 % всех коммерческих перевозок грузов приходится на железнодорожный транспорт [7].

В работе [8] рассматривается процесс автоматизации идентификации железнодорожных подвижных единиц с помощью гибридных нейроиммунных моделей, базирующихся на методе автоматического распознавания инвентарных номеров вагонов и формировании базы данных устойчивых интегральных признаков, которые обобщают возможные индивидуальные конструктивные особенности, что в процессе эксплуатации позволяет обучить систему технического зрения распознавать всевозможные повреждения и восстанавливать искаженный номер при считывании.

На сетевых сортировочных станциях, крупных грузовых и в местах примыканий путей необщего пользования компаний с большой погрузкой установлены «Автоматизированные системы коммерческого осмотра поездов и вагонов» (далее — АСКО ПВ) и, где необходимо, «Автоматизированная система контроля инвентарных номеров вагонов» [4, 5].

С технической стороны результат работы АСКО ПВ — звуковой и визуальный контроль всех типов габарита погрузки и габарита подвижного состава; визуальный контроль подвижного состава в коммерческом отношении при прохождении в оборудованной следующими датчиками зоне: начала состава, счета вагонов, счета колесных пар, контроля габаритности погрузки, а также телекамеры с трех сторон вагона и контроля запорно-пломбировочных устройств люков вагонов в реальном времени на экране оператора в режиме «ПОЛИЭКРАН» или полноэкранном режиме; формирование отчета о нарушениях габарита погрузки и подвижного состава; накопление видеоархива. Применение комплекса АСКО ПВ позволило автоматизировать процедуру проведения коммерческого осмотра по прибытии на станцию, то есть проведение коммерческого осмотра приемосдатчиками в парке не требуется, что позволяет сократить время обработки состава по прибытии, за счет чего увеличивается перерабатывающая способность станции [9, 10].

Стоит отметить, что установка комплекса рентабельна в основном на сетевых сортировочных станциях из-за высокой стоимости. Это делает невозможным его применение на грузовых станциях, где осуществляются начально-конечные операции с вагонами: погрузка и выгрузка. А управление работой комплекса, обработка полученной информации и принятие решений осуществляется работником.

Приведенные выше системы автоматизации коммерческого осмотра, несмотря на высокое качество получаемого изображения и беспристрастность в контроле нарушения габарита подвижного состава, по-прежнему требуют участия человека, и окончательное решение о допуске подвижного состава к движению принимает человек, хоть и основываясь на материалах, полученных с автоматизированных систем.

Развитие интеллектуальных систем в области грузовой и коммерческой работы в полной мере подходит под следующие задачи, которые ставятся руководством компании ОАО «Российские железные дороги» в проекте «Цифровая железная дорога» [11]:

– повышение качества и расширение линейки транспортно-логистических услуг;

– повышение безопасности движения, сохранности и надежности;

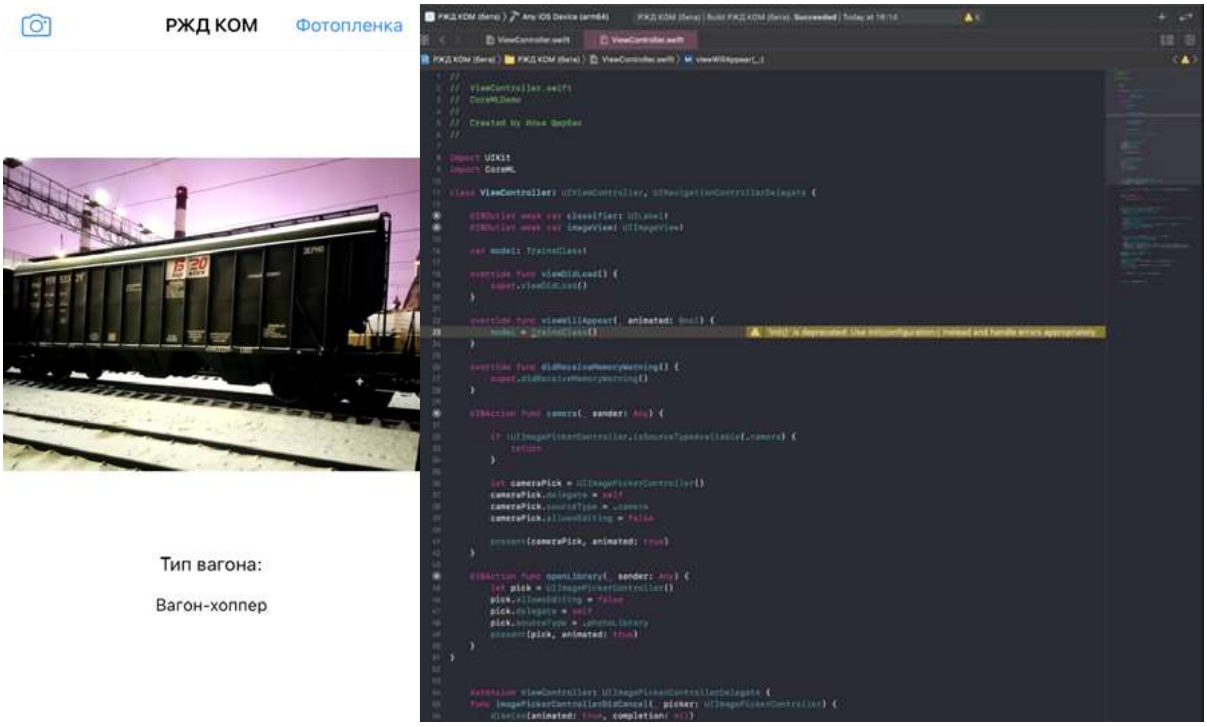



Рис. 2. Работа программы для идентификации и определения типа подвижного состава

– создание микропроцессорных систем управления и автоматизированных систем для повышения производительности труда;

– снижение влияния «человеческого фактора» на принимаемые решения.

Дорожная карта программы «Цифровая экономика Российской Федерации» предусматривает следующие направления, коррелирующие с инициативами программы «Цифровая железная дорога»:

– покрытие дорог сетями связи с беспроводной передачей данных, которые необходимы для современных интеллектуальных технологий;

– сбор и обработка телематической информации федеральной LPWAN-сетью узкополосной связи;

– доступность хранения и обработки данных на всей территории России для всех категорий населения [3].

Авторским коллективом предложена принципиально новая технология проведения коммерческого осмотра, влекущая за собой изменения основных принципов грузовой и коммерческой работы в современном виде. Она развивает направление, предусматривающее обеспечение возможностью беспроводной передачи данных, необходимых для развития современных интеллектуальных транспортных и логистических технологий. Актуальность и новизна для компании ОАО «Российские железные дороги» представлены в статье [12]. А подробное описание работы прототипа мобильного приложения для реализации и внедрения интеллектуальной технологии приведено в статье [13]. Результаты разработки приложения для распознавания типов вагонов и знаков опасных грузов зарегистрированы в 2021 году Федеральной службой по интеллектуальной собственности [14].

Программа разработана на языке программирования Swift. Для создания и обучения нейронной сети использовался Framework CoreML. Среда подходит для операций классификации фотографий, определения и распознавания объектов на фотографии. Использование такого варианта решения позволило сэкономить время на создании самой нейронной сети и сфокуси-

роваться на ее обучении. На рис. 2 изображен фрагмент работы программы для идентификации и определения подвижного состава и приведен фрагмент исходного кода программы [14].

Стоит отметить, что разработка не конкурирует с уже внедренными комплексами автоматизации, а, наоборот, дополняет их. Так, например, комплекс АСКО ПВ применяется на сетевых сортировочных станциях и осуществляет контроль в коммерческом отношении в пути следования вагона от грузоотправителя к грузополучателю, а также на границе пути необщего пользования, где производится контроль при приеме вагонов к перевозке. Но во втором случае установка будет целесообразна только в случае большой суточной переработки вагонов, например на станции Лужская на пути необщего пользования компании «Ростерминалуголь», где суточная выгрузка составляет порядка 1400 вагонов.

Предлагаемая интеллектуальная система приема вагонов к перевозке подойдет для станций, имеющих пути необщего пользования с небольшой суточной работой, на которых установка АСКО ПВ является экономически нецелесообразной.

На текущий момент прием вагона к перевозке проходит по технологии, соответствующей запросам того времени, для которого она разрабатывалась. Такая технология устарела и не отвечает существующим запросам по скорости и методам реализации по нескольким причинам:

– длительное ожидание приемосдатчика груза и багажа со стороны ОАО «РЖД»;

– низкая производительность труда приемосдатчика груза и багажа;

– длительная процедура приема вагона к перевозке и оформления перевозочных документов.

Для решения задач по автоматизации производственных процессов разработано множество математических методов: теория принятия решений, теория нечеткости, центральная предельная теорема, векторная оптимизация, алгоритм построения робастных регуляторов, теория сетевого планирования и управления.

Эти методы эффективно решают задачи оптимизации процессов, но внесение и обработка входных и выходных данных производится человеком. Для внедрения нового алгоритма приема вагонов к перевозке необходимо автоматизировать обработку данных и принятие решения. Для этого подходит технология автоматизации с помощью нейронной сети. Реализация интеллектуальной системы приема вагонов к перевозке, основанной на этой технологии, поможет осуществить переход к алгоритму приема вагонов к перевозке, представленному на рис. 3.

Предлагаемая авторами технология коммерческого осмотра вагонов при приеме вагона к перевозке предполагает проведение коммерческого осмотра клиентом на своем пути необщего пользования, на котором был погружен вагон, с помощью программного комплекса. Это позволит исключить повторные подачи вагонов для устранения неисправностей, снизить занятость маневровых локомотивов, горловин, путей и простои вагона. Согласно данной технологии при обнаружении нейронной сетью коммерческих неисправностей, грузоотправитель сразу получит список и рекомендации по их устранению, что позволит в кратчайшие сроки произвести исправления и оперативно осмотреть вагон еще раз. При принятии вагона к перевозке программа запустит автоматическое оформление документов в АС «Этран». Алгоритм составлен на основе концепции совершенствования технологии приема вагонов к перевозке.

Концепция заключается в том, чтобы грузоотправитель самостоятельно проводил процедуру приема вагона к перевозке посредством предложенного инструментария, базирующегося на синтезе интеллектуальных цифровых технологий, для повышения ее эффективности и информатив-

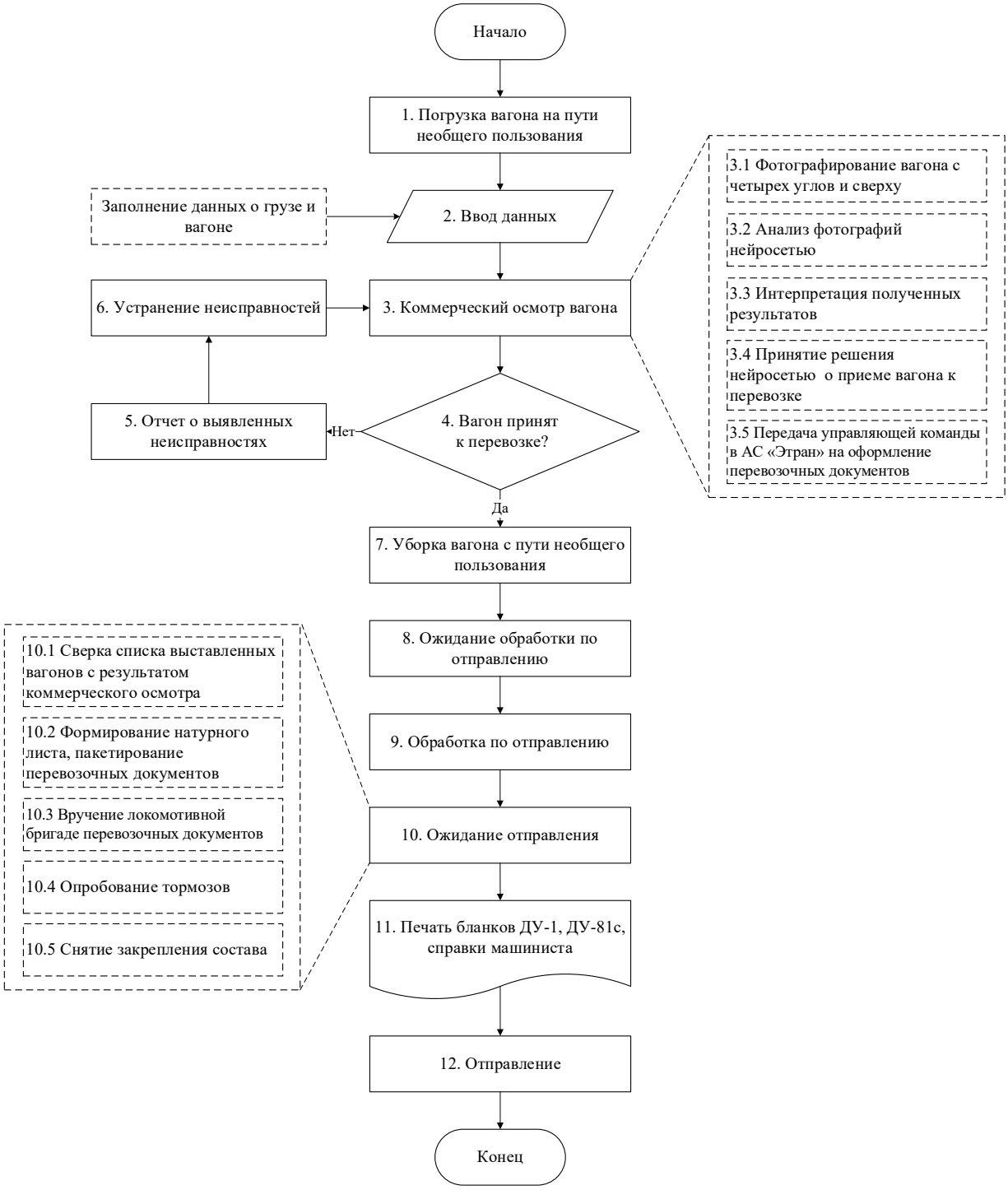



Рис. 3. Перспективный алгоритм обработки вагонов по отправлению

ности стейкхолдеров перевозочного процесса, основанного на эмпирических предпосылках, теоретических основах, реализации и критериях достоверности (рис. 4).

Предлагаемая концепция основана на ряде принципов:

*Принцип 1* — формирование базы данных типовых неисправностей по номенклатуре гру-

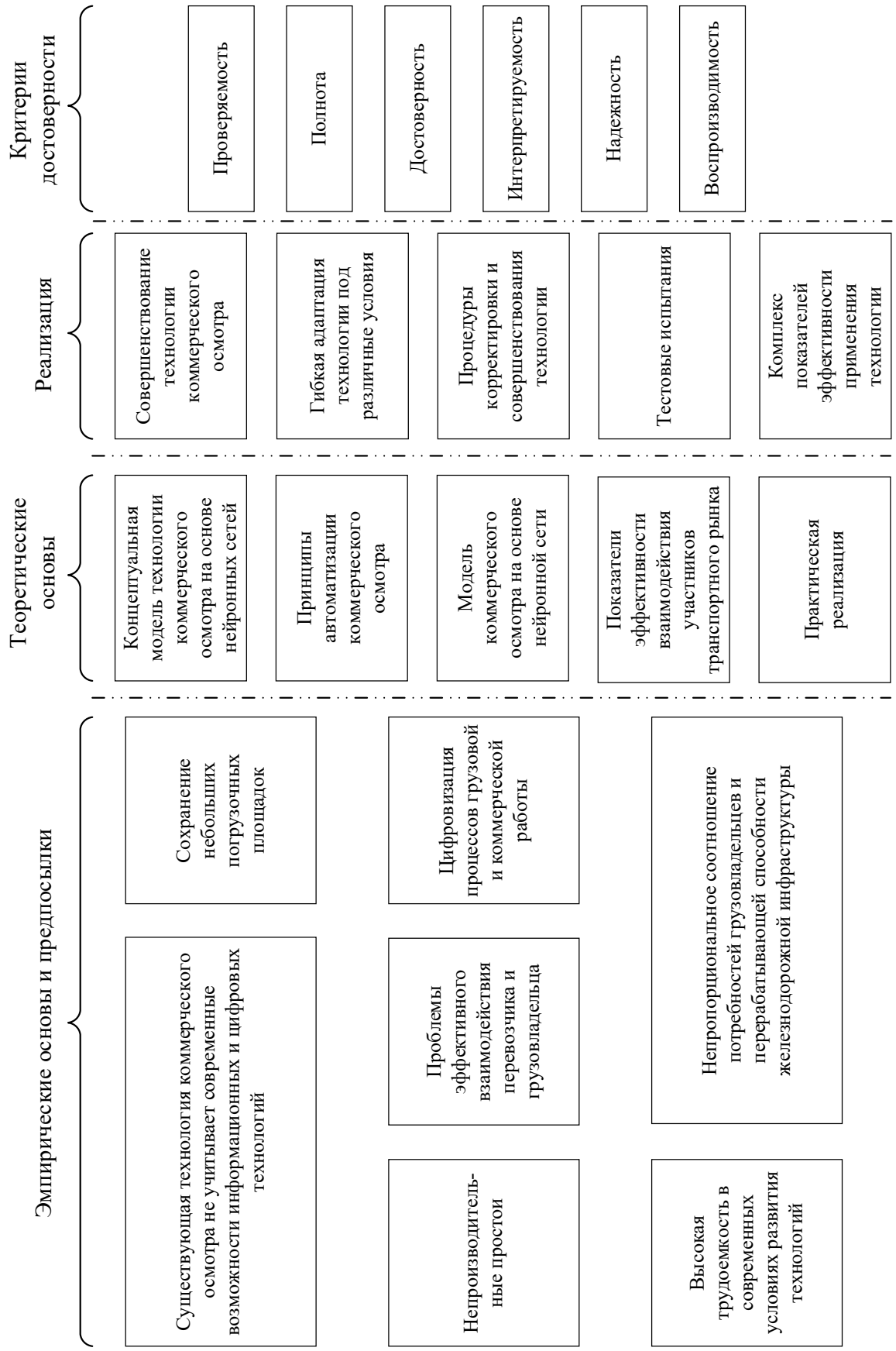



Рис. 4. Концепция совершенствования технологии приема вагонов к перевозке

зов. Создание базы данных типовых коммерческих неисправностей для их дальнейшей идентификации по общим характеристикам.

*Принцип 2* — настройка и адаптация программного обеспечения для интеграции баз данных типовых неисправностей. Создание программного продукта, способного выполнить весь комплекс операций, проводимых в процессе приема вагона к перевозке.

*Принцип 3* — повышение надежности и уменьшение погрешностей. Повышение сохранности вагона и груза в процессе перевозки и надежности доставки груза грузополучателю. *Принцип 4* — интеграция с существующими система автоматизации коммерческого осмотра. Интеграция интеллектуальной системы приема вагонов к перевозке с автоматизированной системой «Этран» и автоматизированной системой коммерческого осмотра поездов и вагонов, в том числе версии 3D. Согласованное управление работой систем для обеспечения работы по «бесшовной» технологии.

*Принцип 5* — гибкая адаптация системы в условиях грузовой базы конкретного полигона. Возможность обучения системы для работы на конкретном полигоне с определенной грузовой базой и для определенного подвижного состава.

*Принцип 6* — мониторинг проблемного парка вагонов с высоким процентом коммерческих неисправностей. Возможность отслеживания времени и места повреждения вагонов и грузов для грузовладельцев, операторов подвижного состава и перевозчика.

*Принцип 7* — самообучение и совершенствование интеллектуальной системы. Обучение системы работе в новых условиях организации перевозки, как человеком, так и самостоятельно — на основе применения алгоритмов распознавания незнакомых условий.

*Принцип 8* — привлечение государственных субсидий и инвестиций на развитие инфраструктуры и стимулирование клиентов к перевозкам по малодеятельным линиям. Равномерное распределение нагрузки на железнодорожную инфраструктуру путем стимулирования использования малодеятельных линий при перевозке несрочных грузов и доставки товаров в отдаленную местность.

Предложенные принципы соответствуют концепции нейросетевого программирования, дополнены массивом данных, собираемых на сети железных дорог, и будут адаптированы для автоматизации осмотра вагонов в коммерческом отношении.

**Заключение**

В статье дана оценке проблеме существующей технологии приема вагонов к перевозке в контексте автоматизации процесса. Выявлены тенденции изменения объема погрузки на железнодорожном транспорте. Определены основные положения в национальном проекте «Цифровая экономика» и программе «Цифровая железная дорога» в части цифровизации грузовой и коммерческой работы.

Представлена сравнительная оценка существующим методам совершенствования и автоматизации грузовой и коммерческой работы. Рассмотрены возможные математические методы для решения поставленной задачи. Предложено применение метода автоматизации с помощью нейронной сети для решения проблемы повышения эффективности технологии приема вагонов к перевозке на станциях с незначительными объемами погрузки.

Разработан алгоритм перспективной технологии обработки вагонов по отправлению. Предложены концепция и принципы совершенствования технологии приема вагонов к перевозке. Направления дальнейших исследований связаны с конкретизацией инструментария для условий малоинтенсивных линий и расширением спектра использования по номенклатуре грузов.

## Библиографический список

1. Годовые отчеты ОАО «РЖД» за 2004–2022 гг. — URL: https://ar2021.rzd.ru/ru (дата обращения: 15.03.2023).

2. Воробьев И. М. Конструктор формирования услуг доставки грузов железнодорожным транспортом на сети ОАО «РЖД» / И. М. Воробьев, А. В. Новичихин, К. Е. Ковалев // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 367–374.

3. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации»: распоряжение Правительства РФ от 28 августа 2017 г. № 1632-р. — URL: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.

4. Автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов. — URL: https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv/ (дата обращения: 24.03.2023).

5. Автоматизированная система контроля инвентарных номеров вагонов. — URL: https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/askin/ (дата обращения: 24.03.2023).

6. Rail and Intermodal terminals. — URL: https://www.camco.be/solutions/rail-intermodal-terminals/ (дата обращения: 24.03.2023).

7. Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень. г. Москва, 2021 год. — URL: https://mintrans.gov.ru/documents/7/11698 (дата обращения: 24.03.2023).

8. Артемьев И. С. Автоматизация процессов идентификации железнодорожных подвижных единиц на основе гибридных нейроиммунных моделей: дисс. … канд. техн. наук / И. С. Артемьев. — СПб.: ПГУПС, 2017. — 158 с.

9. Патентон — база патентов и изобретений, зарегистрированных в Советском Союзе и России, патентный поиск. — URL: https://patenton.ru/patent/RU2252170C1 (дата обращения: 24.03.2023).

10. Тонкова М. Л. Инновационные технологии коммерческого осмотра поездов и вагонов/ М. Л. Тонкова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 1. — С. 130–138.

11. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога»: распоряжение ОАО «РЖД» от 5 декабря 2017 г. № 1285. — URL: https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=56885 (дата обращения: 02.04.2023).

12. Смирнов Ф. А. Автоматизация коммерческого осмотра вагонов с помощью искусственного интеллекта / Ф. А. Смирнов, Е. К. Коровяковский; отв. за выпуск: О. В. Гимазетдинова, М. С. Панова // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Санкт-Петербург, 19–26 апреля 2021 года. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021.

13. Коровяковский Е. К. Автоматизация коммерческого осмотра вагонов с использованием элементов искусственного интеллекта / Е. К. Коровяковский, Ф. А. Смирнов, И. А. Щербак и др.; под ред.: А. А. Краснощека, П. К. Рыбина// Четвертая международная научно-практическая конференция «Развитие инфра-структуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, 6–8 октября 2021 г.): сборник трудов: в 2 частях. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. — Ч. 1. — С. 76–82.

14. Смирнов Ф. А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022617520. 11.04.2022 / 21.04.2022 Программа для определения типа вагонов и опасных грузов / Ф. А. Смирнов, И. А. Щербак, М. А. Крылов и др.

Дата поступления: 26.04.2023
Решение о публикации: 12.05.2023

**Контактная информация:**
СМИРНОВ Федор Андреевич — аспирант; fsmirnov96@gmail.com
НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, проф.; novitchihin@bk.ru
КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук, доц.; kovalev_kostia@mail.ru

# Improving Freight and Commercial Work on Railway Transport: Concept and Tools

**F. A. Smirnov, A. V. Novichikhin, K. E. Kovalev**

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

**For citation:** Smirnov F. A., Novichikhin A. V., Kovalev K. E. Improving Freight and Commercial Work on Railway Transport: Concept and Tools // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 302–313. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-302-313

## Summary

**Purpose:** The article offers a solution to the problem of low efficiency of freight and commercial work at railway stations with a small loading volume. The goals and objectives of the national project "Digital Economy" and the program "Digital Railway" are considered. The methods of improving freight and commercial work currently used in railway transport to increase the productivity of stations and to increase workload without capital investments in infrastructure are outlined. A prospective algorithm for processing wagons on departure has been formed. The concept of improving the technology of receiving a wagon for transportation is proposed. An intelligent system for receiving wagons for transportation using a neural network has been developed. The results of the development of a program for determining the types of rolling stock in the image are shown. **Methods:** Methods of analysis, synthesis and neural networks, the theory of automatic control are used. **Results:** A solution to the problem of increasing the efficiency of the technology of receiving wagons for transportation at stations with insignificant loading volumes is proposed. **Practical significance:** The introduction of the developed intelligent system at railway stations will improve the quality and speed of commercial inspection when accepting a car for transportation.

**Keywords:** Neural network, automation of commercial inspection, freight and commercial work, digitalization, shipper, carrier, transportation management.

## References

1. *Godovye otchety OAO "RZhD" za 2004–2022 gg.* [Annual reports of Russian Railways for 2004–2022]. Available at: https://ar2021.rzd.ru/ru (accessed: March 15, 2023). (In Russian)

2. Vorob'ev I. M., NovichikhinA. V., Kovalev K. E. Konstruktor formirovaniya uslug dostavki gruzov zheleznodorozhnym transportom na seti OAO "RZhD" [Designer of the formation of services for the delivery of goods by rail on the network of Russian Railways]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 367–374. (In Russian)

3. *Programma "Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii": rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 avgusta 2017 g. № 1632-r* [Program "Digital Economy of the Russian Federation": Decree of the Government of the Russian Federation of August 28, 2017 № 1632-r]. Available at: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf. (In Russian)

4. *Avtomatizirovannaya sistema kommercheskogo osmotra poezdov i vagonov* [Automated system for commercial inspection of trains and wagons]. Available at: https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv/ (accessed: March 24, 2023). (In Russian)

5. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya inventarnykh nomerov vagonov* [Automated system for monitoring the inventory numbers of cars]. Available at: https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/askin/ (accessed: March 24, 2023). (In Russian)

6. Rail and Intermodal terminals. Available at: https://www.camco.be/solutions/rail-intermodal-terminals/ (accessed: March 24, 2023).

7. *Transport Rossii. Informatsionno-statisticheskiy byulleten'. g. Moskva, 2021 god* [Transport of Russia. Information-statistical bulletin]. Available at: https://mintrans.gov.ru/documents/7/11698 (accessed: March 24, 2023). (In Russian)

8. Artem'ev I. S. *Avtomatizatsiya protsessov identifikatsii zheleznodorozhnykh podvizhnykh edinits na osnove gibridnykh neyroimmunnykh modeley: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Automation of the identification processes of railway rolling units based on hybrid neuroimmune models: diss. … cand. tech. Sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, 158 p. (In Russian)

9. *Patenton — baza patentov i izobreteniy, zaregistrirovannykh v Sovetskom Soyuze i Rossii, patentnyy poisk* [Patenton — database of patents and inventions registered in the Soviet Union and Russia, patent search]. Available at: https://patenton.ru/patent/RU2252170C1 (accessed: March 24, 2023). (In Russian)

10. Tonkova M. L. Innovatsionnye tekhnologii kommercheskogo osmotra poezdov i vagonov [Innovative technologies for commercial inspection of trains and wagons]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2019, vol. 16, Iss. 1, pp. 130–138. (In Russian)

11. *Kontseptsiya realizatsii kompleksnogo nauchno-tekhnicheskogo proekta "Tsifrovaya zheleznaya doroga": rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 5 dekabrya 2017 g. № 1285* [The concept of the implementation of the integrated scientific and technical project "Digital Railway": order of JSC "Russian Railways" dated December 5, 2017 № 1285]. Available at: https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=56885 (accessed: April 02, 2023). (In Russian)

12. Smirnov F. A., KorovyakovskiyE. K. *Avtomatizatsiya kommercheskogo osmotra vagonov s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta. Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. — Sankt-Peterburg, 19–26 aprelya 2021 goda* [Automation of the commercial inspection of cars using artificial intelligence. Transport: problems, ideas, prospects: a collection of proceedings of the LXXXI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. St. Petersburg, April 19–26, 2021]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2021. (In Russian)

13. Korovyakovskiy E. K., Smirnov F. A., Shcherbak I. A. *Avtomatizatsiya kommercheskogo osmotra vagonov s ispol'zovaniem elementov iskusstvennogo intellekta. Chetvertaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Razvitie infra-struktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh" (Sankt-Peterburg, 6–8 oktyabrya 2021 g.): sbornik trudov: v 2 chastyakh* [Automation of the commercial inspection of cars using elements of artificial intelligence. Fourth International Scientific and Practical Conference "Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems" (St. Petersburg, October 6–8, 2021): collection works: in 2 parts]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2022, part 1, pp. 76–82. (In Russian)

14. Smirnov F. A., Shcherbak I. A., Krylov M. A. et al. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM № 2022617520. 11.04.2022 / 21.04.2022 Programma dlya opredeleniya tipa vagonov i opasnykh gruzov* [Certificate of registration of the computer program No. 2022617520. 11.04.2022 / 21.04.2022 Program for determining the type of wagons and dangerous goods]. (In Russian)

Received: April 26, 2023
Accepted: May 12, 2023

**Author's information:**
Fedor A. SMIRNOV — Postgraduate Student; fsmirnov96@gmail.com
Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novitchihin@bk.ru
Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering; kovalev@pgups.ru

УДК 656:625.45:331.45:625.7

# Основы методики выбора и обоснования видов городского общественного транспорта Ирака

**Е. П. Дудкин, Хусам Аббас Мохсин Абужваид**

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

**Для цитирования:** *Дудкин Е. П., Абужваид Хусам Аббас Мохсин.* Основы методики выбора и обоснования видов городского общественного транспорта Ирака // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 314–324. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-314-324

## Аннотация

**Цель:** Совершенствование системы городского общественного транспорта (ГОТ), обеспечивающей эффективность функционирования его в городах Ирака. Выбор и обоснование вида городского транспорта в г. Наджафе (Ирак), который обеспечит повышение безопасности и скорости передвижения пассажиров. Обоснование сфер применения различных видов транспорта в городах Ирака путем оптимизации и выбора видов пассажирского транспорта, исходя из объема перевозок, пассажиронапряженности и характеристик городов. **Методы:** Методы статистической обработки, функционального анализа, математического моделирования, теории вероятности, анализ городского пассажирского транспорта в иракских городах, классификации городов Ирака по основным характеристикам: плотность населения, площадь, уровень автомобилизации, максимальная протяженность территории, анализ напряженности пассажиропотока и средней вместимости подвижного состава. **Результаты:** Откорректированы новые границы интервалов средней напряженности пассажиропотока для групп городов Ирака, что позволяет выбирать вид ГОТ и его долю перевозок для каждого типа подвижного состава. Предложено распределение видов городского транспорта, учитывающее особенности городов Ирака в соответствии с их классификацией. **Практическая значимость:** Применение разработанных предложений и мероприятий позволило: выполнить обоснование и выбор видов городских транспортных систем для города Наджафа; выполнить расчет интенсивности пассажиропотоков в направлении движения по шести различным маршрутам с максимальным трафиком для города Наджафа; определить классификацию рядов вместимости подвижного состава и варианты ГОТ для городов Ирака. Представить рекомендации по развитию транспортной сети городов Ирака. Предложенное распределение видов городского транспорта улучшает транспортное обслуживание населения и повышает качество использования каждого вида транспорта.

**Ключевые слова:** Методика совершенствования системы городского общественного транспорта, вместимость подвижного состава, напряженность пассажиропотока, характеристики иракских городов, особенности функционирования транспорта в городах Ирака, классификация городов.

Исследования в области ГТС в Ираке немногочисленны и недостаточны. Существует серьезная проблема, связанная с планированием перевозок общественным транспортом в связи с увеличением численности населения городов, высоким спросом на перевозки и широким использованием личных транспортных средств. С 2003 года количество частных транспортных средств увеличилось на 122 %. Кроме того, существуют сезонные проблемы из-за наплыва туристов в некоторых городах Ирака [1].

Проведенный анализ видов городского общественного транспорта показал, что для городов Ирака наиболее интересные варианты — это ско-

ТАБЛИЦА 1. Количество посетителей города Наджафа с населением 1 066 428 человек при разных сезонных событиях

| Вид события | Количество посетителей, чел. |
|---|---|
| Рамадан | 10 392 900 |
| Arbaeenea | 11 000 000 |
| Ашура | 3 070 000 |
| Арафат | 1 434 732 |
| Четвергам | 18 014 360 |
| Другие религиозные события | 6 928 600 |

ростной трамвай, навесные и подвесные монорельсовые дороги, система «Трамвай-поезд». Также выполнен сравнительный анализ основных видов городского общественного транспорта и его влияние на экологические и экономические системы.

В Ираке количество видов общественного транспорта довольно ограничено. В основном используются автобусы, и при этом высока доля личного транспорта, что приводит к росту аварийности. Также существуют сезонные транспортные проблемы в некоторых городах, когда население увеличивается более чем в 6 раз в определенное время в году в зависимости от события, например в городе Наджафе, как показано в табл. 1 [2].

Анализ исследований, выполненных Д. С. Самойловым, Э. А. Сафроновым, В. А. Черняевой, определил следующую последовательность выполнения выбора видов ГОТ: на первом этапе предлагается *спрогнозировать транспортную подвижность*, такой прогноз с определением границ и допустимых колебаний для групп городов на краткосрочную и долгосрочную перспективу представлен в табл. 2 [3–5].

После прогнозирования транспортной подвижности необходимо рассчитать среднюю дальность поездки. Сетевая дальность поездки определяется по формулам:

$$\left.\begin{aligned} \left|\overline{l}_{\text{ср}}\right| &= 1,3 + 0,3\sqrt{F} \\ \left|\overline{l}_{\text{мин}}\right| &= 1,3 + 0,13\sqrt{F} \\ \left|\overline{l}_{\text{макс}}\right| &= 1,3 + 0,72\sqrt{F} \end{aligned}\right\},$$

где $F$ — площадь жилой зоны, км$^2$.

После определения средней дальности поездки проводятся обоснования *пассажиропотоков*.

Для определения пассажиропотока город делится на несколько районов (рис. 1).

Чем больше районов, тем точнее расчеты, но вычисления усложняются. Затем идет этап определения количества жителей в каждом районе, количества рабочих и посетителей, а также разрабатывается базовый дизайн сети. Далее определяют виды транспорта и корреспонденции между регионами. Расчеты корреспонденций производятся по формуле:

$$P_{ij} = P_i\left(d_{ij}A_j\right) / \sum_i^n A_j d_{ij},$$

ТАБЛИЦА 2. Прогнозы трафика

| Группа городов, тыс. чел. | Транспортная подвижность, число поездок на 1 жителя | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Долгосрочный прогноз | | | Краткосрочный прогноз | | |
| | Относительная подвижность, $\lambda_c$ | Возможные отрезки колебаний | | Относительная подвижность $\lambda_c$ | Возможные отрезки колебаний | |
| | | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ |
| I (1000–2000) | 635 | 580 | 690 | 575 | 20 | 30 |
| II (500–1000) | 595 | 515 | 670 | 535 | 55 | 10 |
| III (250–500) | 555 | 460 | 650 | 495 | 400 | 590 |
| IV (100–250) | 485 | 385 | 585 | 425 | 325 | 525 |
| V (50–100) | 405 | 300 | 510 | 345 | 240 | 450 |

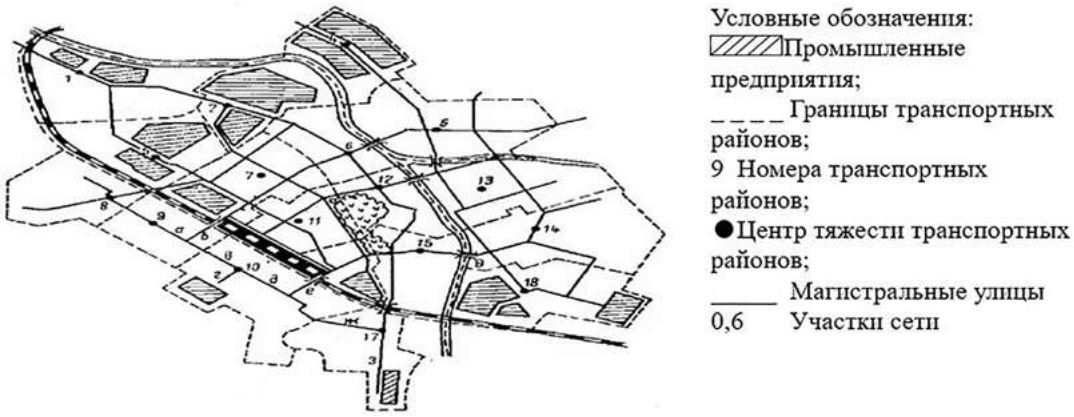



Рис. 1. Разбивка города на расчетные транспортные районы (зоны)

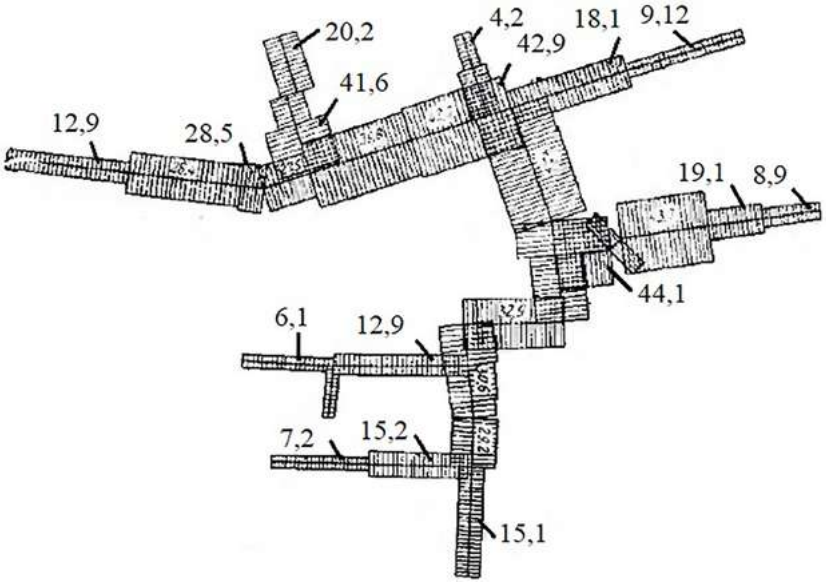



Рис. 2. Пример вида картограммы пассажиропотоков

где $P_{ij}$ — потенциальное количество рабочих из зоны отправления $j$ в зону прибытия $i$;

$P_i$ — количество рабочих на участке $j$;

$d_{ij}$ — зависимость распределения передвижений от потраченного времени;

$A_j$ — количество рабочих на участке выезда.

Исходя из полученной информации строится *график пассажиропотоков* (рис. 2), *предлагаются варианты подвижного состава по пропускной способности*. Если известна средняя вместимость, то можно определить весь ряд вместимости. Среднюю вместимость рассчитывают по формуле:

$$\Omega = \frac{\delta_{\text{н}} \cdot B_M \cdot t_{\text{ож}} \cdot l_{\text{ср}}}{\delta_{\text{п}} \cdot k_M \cdot C},$$

где $\Omega$ — относительная емкость подвижного состава, пасс.;

$\delta_{\text{н}}$ — плотность населения, тыс. жит/км$^2$;

$B_M$ — количество рейсов за 24 часа;

$t_{\text{ож}}$ — период ожидания подвижного состава, мин;

$l_{\text{ср}}$ — относительное расстояние маршрута, км;

$\delta_{\text{п}}$ — концентрация сети подвижного состава, км/км$^2$;

$k_{\text{М}}$ — дорожный коэффициент;

$$C = \frac{200}{k_с k_д k_{нп} \rho},$$

здесь $k_с k_д k_{нп}$ — показатели колебания пассажиропотока в зависимости от времени года, расстояния маршрута и направленности;

$\rho$ — доля использования определенного подвижного состава во время наивысшей нагрузки транспорта (%).

Определив варианты необходимой пропускной способности транспорта и построив кривые распределения автоперевозок с учетом плотности пассажиропотока, допускается вычислить коэффициенты распределения перевозок между вариантами различного по пропускной способности транспорта для каждой из категорий городов и получить сведения о разделении перевозок между типами подвижного состава городского маршрутного пассажирского транспорта страны.

Для расчета необходимого количества подвижного состава используется следующая формула:

$$W_{дв} = A l_{сР} \alpha_\gamma / 365 \Omega k_{нп} h v_\Sigma,$$

где $A$ — прогнозируемый объем трафика в год, пас.;

$l_{сР}$ — относительная удаленность рейса, км;

$\alpha$ — показатель сезонной изменчивости пассажиропотока;

$\gamma$ — транспортная неравномерность за сутки;

$\Omega$ — относительная емкость подвижного состава;

$k_{нп}$ — среднесуточный показатель пассажиропотока за 24 часа;

$v_\Sigma$ — быстродействие эксплуатации, км/ч.

ТАБЛИЦА 3. Показатели структуры городского общественного транспорта

| Индекс | Математические формулы | Величина | Сфера применения |
|---|---|---|---|
| Предложенная удельная система ГПТ | $G = \Omega \Pi W / N$ | место км жит. сут. | Прогнозирование предложений на услуги транспорта |
| Используемая удельная система ГПТ | $\overline{\ell} = A_M \ell_M / N$ | пасс.-км жит. сут. | Определение потребностей в транспортных услугах |
| Относительная скорость перемещения на одного жителя. Параметры эффективности ГПТ. | $V_{пер} = \overline{\ell} / t_{жит} = \ell_{пас} / t_{пас} = A_M \ell_M / N t_{жит}$ | пасс.-км жит. ч | Отбор оптимального вида системы ГПТ |
| Среднесуточный показатель применения пропускной способности подвижного состава | $K_Н = \overline{\ell} / G = A_M \ell_M / \Omega \Pi W$ | — | Определение эффективности системы ГПТ и качества предоставляемых услуг |

где $\Omega$ — относительная емкость подвижного состава, мест;

$\Pi$ — пробег одной единицы транспорта за сутки, км;

$W$ — объем транспорта, ед.;

$N$ — численность населения города, жит.;

$A_M$ — объем перевозок в рейсах, пасс.;

$t_{пас}$ — время пассажира в пути, мин;

$\ell_M$ — расстояние передвижения, км;

$t_{жит}$ — среднесуточный период времени перемещений жителя на транспорте, мин, $t_{жит} = t_{пас} A_м / N K_п$;

$\ell_{пас}$ — удаленность пассажирских перевозок, км.

ТАБЛИЦА 4. Показатели оценки ГОТ

| Название индикатора | Формула для расчета | Расшифровка |
|---|---|---|
| Срок окупаемости мероприятий ($T_{ок}$) — промежуток времени, в течение которого инвестиции в местную транспортную программу будут пополняться за счет дохода | $T_{ок} = \frac{\sum_{T=0}^{T}(К_i + Э_i + З)}{П_1 + П_2 + \ldots П_n}$ | за $i$-тый год<br>$К_i$ — капиталовложения с учетом дисконтирования;<br>$Э_i$ — затраты на ремонт;<br>З — остальные затраты (заработная плата, отчисления и налоги и др.);<br>П — прибыль |
| Производительность труда на разновидностях транспорта ($П_{тр}$) — анализ производительности рабочих возможностей | $П_{тр} = \frac{\sum_{T=0}^{T} Q_i}{\sum_{T=0}^{T} \tau_i}$ | $Q_i$ — объем перевозок $i$-тым видом транспорта;<br>$\tau_i$ — количество его сотрудников |
| Показатель удовлетворения потребностей в транспорте ($K_{утп}$) | $K_{утп} = \frac{П}{C}$ | П — общий объем предложения — совокупный объем услуг в стоимостном или натуральном виде;<br>С — общий показатель платежеспособного спроса |
| Уровень занятости транспортных средств ($K_{ук}$) — анализ излишков и недостатков видов транспорта для удовлетворения платежеспособной потребности | $K_{ук} = N_{испр} / N_{тр}$ | $N_{испр}$ — количество работоспособного транспорта конкретного вида;<br>$N_{тр}$ — количество транспорта конкретного типа, необходимое для удовлетворения платежеспособной потребности |
| Показатель аварийности ($K_а$), показывающий состояние безопасности дорожного движения | $K_а = A / L$ | $A$ — количество аварий на дорогах и дорожно-транспортных происшествий;<br>$L$ — величина пробега |

Факторы, определяющие процесс спроса и предложения, приведены в табл. 3.

Вычисляются транспортные потребности жителей, схемы их передвижения и потребность в транспортных услугах.

Эти данные позволяют дать комплексную оценку эффективности транспортных систем для городов и регионов.

Показатели, которые оценивают ГОТ с точки зрения удовлетворенности потребностей на услуги по их ассортименту и количеству, нехватке транспортных средств и наличия запасного или избыточного оборудования, безопасности дорожного движения, влияния транспорта на окружающую среду, соответствие транспортного комплекса преобладающим условиям в регионе представлено в табл. 4.

Далее требуется рассчитать средние напряженности пассажиропотока $\sigma_{ср}$ и средние вместимости подвижного состава $\Omega_{ср}$. Построены кривые размещения трафика по рейсам, рассчитаны разновидности городской системы общественного транспорта и запасы для каждого типа подвижного состава. Исследование ограничивается городами, население которых не превышает двух миллионов человек.

*На первом этапе* вычисляются средние напряженности пассажиропотока на маршрутах в сутки $\sigma_м$. Для расчета средней напряженности пассажиропотока на маршрутах используется формула:

$$\sigma_{ср} = f\left(N, L, k_H, k_1, \delta_H, А\right),$$

где $\sigma_{ср}$ — средняя напряженность пассажиропотока на маршрутах (тыс. пасс.-км/км в сутки);

$N$ — численность населения города тыс. чел.;

$L$ — предельная длина территории (км);

$K_Н$ — коэффициент непрямолинейности сообщений;

$K_1$ — коэффициент, учитывающий уровень развития транспортной системы;

$\delta_н$ — плотность населения города (чел/км$^2$);

А — степень загруженности города автомобилями (число автомобилей на 1000 жителей).

Для расчета средней напряженности автомобильного пассажиропотока в сутки для городов применяется выражение:

$$\sigma_{ср} = \frac{\delta_н}{k_1} \cdot \begin{pmatrix} 391 + 231 \cdot \ln \delta_н - \\ -34,9\left(0,705 \cdot e^{0,0057А}\right) + \\ +0,982 \cdot \left(0,705 \cdot e^{0,0057А}\right)^2 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \dfrac{0,8 \cdot L \cdot k_н \cdot \left(0,8 \cdot L \cdot k_н - 2\right)}{3,2 \cdot L \cdot k_н - 5,3 \lg^2\left(0,8 \cdot L \cdot k_н\right) - \\ -9,2 \lg\left(0,8 \cdot L \cdot k_н\right) - 1} \end{pmatrix}.$$

А с целью определения и проектирования городского пассажирского общественного транспорта в новых городах — формула:

$$\sigma_{ср} = \frac{10}{k_1}\left(922,9 - 34,9 \cdot D + 0,982 \cdot D^2\right) \times$$

$$\times \begin{pmatrix} \dfrac{0,92 \cdot L^2 - 1,92 \cdot L}{3,84L - 5,3 \lg^2\left(0,96 \cdot L\right) - \\ -9,2 \lg\left(0,96 \cdot L\right) - 1} \end{pmatrix},$$

где $D$ — годовой доход на душу населения, тыс. руб.

Для определения числа вариантов подвижного состава необходимо рассчитать среднюю вместимость подвижного состава по формуле, предложенной профессором Э. С. Сафроновым:

$$\Omega = \left[K_1 + \left(LB\psi - 0,33K_1\right)K_2\right],$$

где $K_1$ — число мест для сидящих пассажиров, пасс.;

$L$ — общая длина единицы транспорта, м;

$B$ — общая ширина единицы транспорта, м;

$\psi$ — показатель применения площади;

0,33 — площадь, занимаемая одним сидящим пассажиром;

$K_2$ — число пассажиров, проезжающих стоя на 1 м$^2$ свободной площади, пасс.

ТАБЛИЦА 5. Распределение рядов вместимостей подвижного состава

| Группа городов | Группы рядов, чел. |
|---|---|
| А | 35, 100, 180, 390, 1200 |
| Б | 35, 100, 180, 390, 950 |
| В | 35, 100, 260, 750 |
| Г | 35, 100, 260, 610 |
| Д | 35, 100, 180, 480 |
| Ж | 35, 100, 180, 390 |
| К | 35, 100, 260 |
| Л | 35, 100, 180 |
| М | 35, 100 |
| Н | 35, 65 |

На основании выполненного анализа можно предложить следующие диапазоны вместимостей подвижного состава для применения в городах Ирака: 20, 35, 100, 180, 260, 390, 480, 610, 750, 950, 1200 (табл. 5) [6].

По параметрам городов Ирака произведен расчет объема перевозок для каждого варианта подвижного состава [7].

Сравнение объема перевозок по каждому виду городского транспортного средства для городов России и Ирака показало схожие результаты, поэтому полученные для городов России зависимости от выбора подвижного состава транспорта рекомендуется использовать в дальнейших исследованиях городов Ирака. Но при этом необходимо разработать границы интервалов и разделение групп городов Ирака по средней плотности пассажиропотока на дорогах [8].

*На втором этапе* производится определение требуемой номенклатуры видов городского пассажирского общественного транспорта, удовлетворяющей спросу на передвижения. При использовании значений максимального типа подвижного состава (ПС), можно вычислить максимальную напряженность пассажиропотока, а далее определить среднее значение суточной напряженности пассажиропотока для городов Ирака (табл. 6). Все города Ирака по границе интервалов средней

ТАБЛИЦА 6. Средние значения суточной напряженности пассажиропотока для городов Ирака

| Тип ПС (вместимость) | $\sigma_{макс}$ | $\sigma_{ср}$ | $\Omega_{ср}$ |
|---|---|---|---|
| 65 | 11,42 | 2,15 | 38 |
| 100 | 15,31 | 5,90 | 56 |
| 180 | 32,28 | 7,20 | 123 |
| 260 | 43,56 | 13,90 | 165 |
| 390 | 59,63 | 17,50 | 259 |
| 480 | 71,20 | 19,60 | 332 |
| 610 | 102,35 | 33,20 | 421 |
| 750 | 136,40 | 40,10 | 563 |
| 950 | 162,34 | 43,60 | 685 |
| 1200 | 193,82 | 63,75 | 869 |

ТАБЛИЦА 7. Границы интервалов для городов Ирака

| Группа городов | Средняя напряженность пассажиропотока на маршрутах, тыс. пасс. км/км в сутки |
|---|---|
| А | 43,60–63,75 |
| Б | 40,10–43,60 |
| В | 33,20–40,10 |
| Г | 19,60–33,20 |
| Д | 17,50–19,60 |
| Ж | 13,90–17,50 |
| К | 7,20–13,90 |
| Л | 5,90–7,20 |
| М | 2,15–5,90 |
| Н | Менее 2,15 |

Рис. 3. Сравнение границ интервалов в России и Ираке

напряженности пассажиропотока были распределены на 10 групп (табл. 7) [9].

Выполненные расчеты, с учетом полученных новых границ интервалов для городов Ирака, определили долю перевозок разнообразными типами транспорта в зависимости от среднесуточной напряженности пассажиропотока. Эти зависимости показаны на рис. 3, где новые границы интервалов групп городов Ирака выделены пунктиром, а городов России — сплошной черной линией. Исходя из этого, итоговые результаты отображены на рис. 4, а именно доли трафика и виды транспорта для каждой группы городов [10, 11].

Апробирование методики выбора и обоснования транспортной системы для городов Ирака было выполнено на примере г. Наджафа.

Для этого города выполнены расчеты пассажиропотоков. Интенсивность транспортных потоков в каждом направлении движения рассчитана по шести различным маршрутам с максимальным трафиком (рис. 5).

Анализ полученных пассажиропотоков (рис. 6) показывает, что их значения меняются в пределах 12 000–15 000 чел. в час.

Теоретические расчеты — средняя напряженность пассажиропотока на маршрутах города

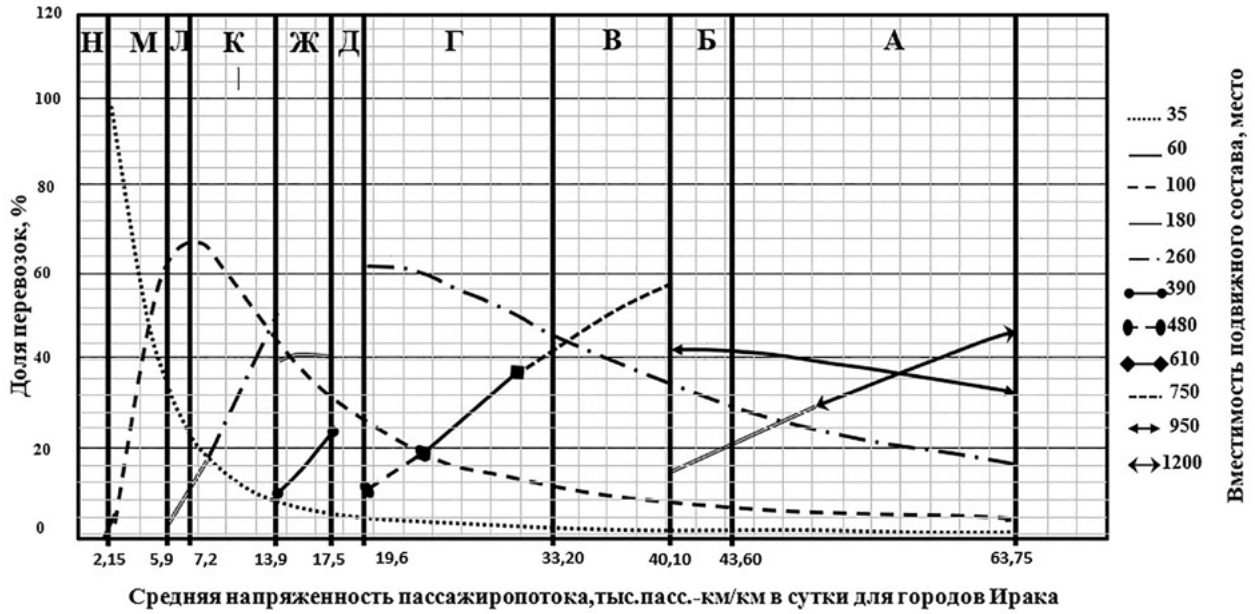



Рис. 4. Объемы движения для каждого вида транспорта, основанные на средней плотности пассажиропотока за 24 часа для городов Ирака

Рис. 5. Размещение исследуемых маршрутов

Наджафа $\sigma_{ср}$ = 14 тыс. пасс. км/км. Таким образом, теоретические пассажиропотоки достаточно близки к практическим, поэтому откорректированные границы интервалов средней напряженности пассажиропотока можно применить и к остальным городам Ирака.

Результаты вычислений объемов перевозок на каждый вариант подвижного состава (в процентах) представлены на рис. 7. На диаграмме отображены существующая система и предлагаемая.

По результатам расчетов объема перевозок существующей и рекомендуемой системы города Наджаф можно отметить следующее:

Рис. 6. Диаграмма маршрутов по уровню пассажиропотока

Рис. 7. Существующее и рекомендуемое распределение видов транспорта на примере города Наджафа

Рис. 8. Стандартная рекомендуемая система и система для сезонных пиковых периодов, %, на примере города Наджаф

– необходимо снизить величину применения автобусов малой вместимости до 9 %;

– следует увеличить величину применения автобусов большой вместимости с 11 до 41 %

– рекомендуется использовать трамваи, которые в настоящее время практически не используются.

В случае сезонных периодов пиковой туристической активности доля перевозок городского общественного транспорта и их варианты показаны на рис. 8: применение микроавтобусов сократилось до 4 %, больших автобусов до 14 %, а использование восьмиосных сочлененных трамваев увеличилось более чем на 50 %.

## Библиографический список

1. Dudkin E. P. Urban Traffic Network Connectivity and Efficiency Evaluation (through the example of Iraq) / E. P. Dudkin, H. A. M. Abujwaid, L. A. Losin // Lecture Notes in Networks and Systems. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. — 2021. — Vol. 402. — Pp. 627–636.

2. Dudkin E. P. Feasibility study of calculation methods for tram track stiffness / E. P. Dudkin, H. A. M. Abujwaid, N. N. Sultanov // BRICS Transport. 2023. — Vol. 2(1). — DOI: 10.46684/2023.1.3.

3. Самойлов Д. С. Городской транспорт. Москва / Д. С. Самойлов. — М.: Стройиздат, 1983. — 384 с.

4. Сафронов Э. А. Транспортные системы городов и регионов / Э. А. Сафронов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. — 140 с.

5. Сафронов Э. А. Методика оптимизации структуры парков подвижного состава пассажирского транспорта / Э. А. Сафронов, К. Сафронов // Автомобильный транспорт. — 2002. — № 11. — С. 14–15.

6. Абужваид Х. А. М. Обоснование сфер применения видов транспорта в городах Ирака / Х. А. М. Абужваид, Е. П. Дудкин // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2020. — С. 13–16.

7. Дудкин Е. П. Выбор вида городского транспорта в городе Наджаф (Ирак) / Е. П. Дудкин, Х. А. М. Абужваид, Азаб А.-Д. Х. // Промышленный Транспорт XXI век. — 2019. — № 1-2. С. 86–89.

8. Дудкин Е. П. Проектирование систем городского общественного транспорта: монография / Е. П. Дудкин, Л. А. Лосин, Х. А. М. Абужваид и др. — УМЦ ЖДТ, 2022.

9. Дудкин Е. П. Оценка связности и эффективности функционирования улично-дорожной сети городов (на примере Ирака) / Е. П. Дудкин, Х. А. М. Абужваид, Л. А. Лосин // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. В 2 томах. Том 1, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — 237 с. — С. 121–124.

10. Дудкин Е. П. Перспективы развития городского общественного транспорта Ирака / Е. П. Дудкин, В. А. Черняева, Х. А. М. Абужваид // Журнал о науке, экономике, практике. Транспорт Российской Федерации. Конкурентноспособность транспортного комплекса. — 2020. — № 5(90). — С. 18–21.

11. Дудкин Е. П. Тестирование эффективности улично-дорожной сети городов (на примере Петрозаводска) / Е. П. Дудкин, Х. А. М. Абужваид, Л. А. Лосин // Российская академия наук Северо-Западная секция содействия развитию экономической науки, Журнал по проблемам региональной экономики. Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2021. — № 2(65). — С. 145–150. — DOI: 10.52897/2411-4588-2021-2-145-150.

Дата поступления: 15.05.2023
Решение о публикации: 31.05.2023

**Контактная информация:**
ДУДКИН Евгений Павлович — д-р техн. наук, проф.; ed@pgups-tempus.ru
АБУЖВАИД Хусам Аббас Мохсин — аспирант; husamalkafai@gmail.com

## Basic Methodology for Selecting and Substantiating Iraqi Urban Public Transport Modes

**E. P. Dudkin, H. A. Abujwaid**

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

**For citation:** Dudkin E. P., Abujwaid H. A. Basic Methodology for Selecting and Substantiating Iraqi Urban Public Transport Modes // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 314–324. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-314-324

Summary
**Purpose:** Improving the urban public transport (UPT) system to ensure its efficient operation in Iraqi cities. Choice and justification of the urban transport mode in Najaf (Iraq), which will improve safety and speed of movement of passengers. Justification of the application areas for different types of transport in Iraqi cities by optimizing and selecting modes of passenger transport based on traffic volume, passenger density and urban characteristics. **Methods:** Statistical processing, functional analysis, mathematical modelling, probability theory, analysis of urban passenger transport in Iraqi cities, classifying Iraqi cities by main characteristics: population density, area, level of motorization, the maximum length of the territory, analysis of passenger traffic intensity and average capacity of the rolling stock. **Results:** New boundaries of average passenger flow density intervals have been adjusted for groups of Iraqi cities, allowing for the selection of the type of UPT and its share of transportation for each type of rolling stock. A distribution of urban transport modes has been proposed, taking into account the characteristics of Iraqi cities according to their classification. **Practical significance:** The application of the developed proposals and activities allows: to justify and select the types of urban transport systems for the city of Najaf; to calculate passenger traffic on six different routes with maximum traffic for the city of Najaf; to determine the classification of rolling stock capacity series and the UPT options for Iraqi cities; to provide recommendations for the development of the transport network of Iraqi cities. The proposed distribution of urban transport modes improves public transport services and the quality of use of each mode of transport.

**Keywords:** Methods of improving the system of urban public transport, capacity of rolling stock, passenger flow intensity, characteristics of Iraqi cities, features of functioning of transport in Iraqi cities, classification of cities.

## References

1. Dudkin E. P., Abuzhvaid H. A. M., Losin L. A. Urban Traffic Network Connectivity and Efficiency Evaluation (through the example of Iraq). Lecture Notes in Networks and Systems. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberiayu. 2021, vol. 402, pp. 627–636.

2. Dudkin E. P., Abuzhvaid H. A. M., Sultanov N. N. Feasibility study of calculation methods for tram track stiffness. BRISS Transport. 2023, vol. 2(1). DOI: 10.46684/2023.1.3.

3. Samoylov D. S. *Gorodskoy transport. Moskva* [City transport. Moscow]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1983, 384 p. (In Russian)

4. Safronov E. A. *Transportnye sistemy gorodov i regionov* [Transport systems of cities and regions]. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 2007, 140 p. (In Russian)

5. Safronov E. A., Safronov K. Metodika optimizatsii struktury parkov podvizhnogo sostava passazhirskogo transporta [Method of optimizing the structure of passenger transport rolling stock fleets]. *Avtomobil'nyy transport* [Automobile transport]. 2002, Iss. 11, pp. 14–15. (In Russian)

6. Abuzhvaid H. A. M., Dudkin E. P. *Obosnovanie sfer primeneniya vidov transporta v gorodakh Iraka. Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Substantiation of the spheres of application of modes of transport in the cities of Iraq.Transport: problems, ideas, prospects: a collection of proceedings of the LXXX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, graduate students and young scientists]. 2020, pp. 13–16. (In Russian)

7. Dudkin E. P., Abuzhvaid H. A. M., Azab A.-D. Kh. Vybor vida gorodskogo transporta v gorode Nadzhaf (Irak) [The choice of the type of urban transport in the city of Najaf (Iraq)]. *Promyshlennyy Transport XXI vek* [Industrial Transport XXI century]. 2019, Iss. 1-2, pp. 86–89. (In Russian)

8. Dudkin E. P., Losin L. A., Abuzhvaid H. A. M. et al. *Proektirovanie sistem gorodskogo obshchestvennogo transporta: monografiya* [Designing urban public transport systems: monograph]. UMTs ZhDT, 2022. (In Russian)

9. Dudkin E. P., Abuzhvaid H. A. M., Losin L. A. *Otsenka svyaznosti i effektivnosti funktsionirovaniya ulichno-dorozhnoy seti gorodov (na primere Iraka). III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov. V 2 tomakh. Tom 1, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda* [Evaluation of connectivity and efficiency of functioning of the street-road network of cities (on the example of Iraq). III Betancourt International Engineering Forum: collection of works. In 2 volumes. Volume 1, St. Petersburg, December 2–3, 2021]. FGBOU VO PGUPS, 2021, 237 p., pp. 121–124. (In Russian)

10. Dudkin E. P., Chernyaeva V. A., Abuzhvaid H. A. M. Perspektivy razvitiya gorodskogo obshchestvennogo transporta Iraka [Prospects for the development of urban public transport in Iraq]. *Zhurnal o nauke, ekonomike, praktike. Transport Rossiyskoy Federatsii. Konkurentno-sposobnost' transportnogo kompleksa* [Journal of science, economics, practice. Transport of the Russian Federation. Competitiveness of the transport complex]. 2020, Iss. 5(90), pp. 18–21. (In Russian)

11. Dudkin E. P., Abuzhvaid H. A. M., Losin L. A. Testirovanie effektivnosti ulichno-dorozhnoy seti gorodov (na primere Petrozavodska) [Testing the efficiency of the street and road network of cities (on the example of Petrozavodsk)]. *Rossiyskaya akademiya nauk Severo-Zapadnaya sektsiya sodeystviya razvitiyu ekonomicheskoy nauki, Zhurnal po problemam regional'noy ekonomiki. Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Russian Academy of Sciences North-West Section of Development Assistance economic science, Journal of Regional Economics. Economics of the North-West: problems and development prospects]. 2021, Iss. 2(65), pp. 145–150. DOI: 10.52897/2411-4588-2021-2-145-150. (In Russian)

Received: May 15, 2023
Accepted: May 31, 2023

**Author's information:**
Evgeny P. DUDKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ed@pgups-tempus.ru
Husam Abbas Mohsin ABUJWAID — Postgraduate Student; husamalkafai@gmail.com

УДК 656.27

# Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели

**К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин**

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

**Для цитирования:** *Ковалев К. Е., Новичихин А. В.* Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 325–335. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335

## Аннотация

**Цель:** Повышение эффективности функционирования линии на основе разработки процедуры планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий на базе нейронных сетей. **Методы:** Применены методы анализа, синтеза, машинного обучения, нейросетевого моделирования. **Результаты:** С помощью регрессионного множественного анализа и математического аппарата разработан набор нейросетевых моделей планирования работы малоинтенсивной железнодорожной линии по комплексу показателей и установлены параметры планирования, позволяющие привести работу линии к положительному финансовому результату линии. **Практическая значимость:** Проведенное исследование является эффективным инструментом для улучшения планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий.

**Ключевые слова:** Малоинтенсивные железнодорожные линии, планирование работы, машинное обучение, регрессионный анализ, нейронные сети.

## Введение

В настоящее время в условиях повышения эффективности функционирования железнодорожных линий и конкурентной борьбы между различными видами транспорта все большее значение приобретает оптимизация планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий. При этом зачастую затраты на функционирование и содержание инфраструктуры таких линий превышают получаемые доходы от перевозочной деятельности.

Для анализа процедуры планирования рассмотрены управляющие, технические, технологические и экономические аспекты логистической деятельности на малоинтенсивных железнодорожных линиях.

В этой связи в статье представлена процедура планирования деятельности железнодорожной линии на основе машинного обучения нейросетевой модели с использованием регрессионного анализа.

Процедура основана на анализе статистических данных и их взаимосвязи за предшествующий период планирования. Статистические данные стали основой для создания нейросетевой модели планирования и определения важности переменных и параметров.

Результаты исследования могут быть использованы при планировании работы малоинтенсивных железнодорожных линий и оценки эффективности их работы.

## 1. Постановка задачи определения эффективности функционирования МИЛ

В работе [1] приведены статистические данные технико-эксплуатационных параметров малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ). Одним из важнейших параметров является финансовый результат (млн руб/год). Эффективность функционирования МИЛ характеризуется финансовым результатом, который определяется как разность между доходами от всех видов перевозочной деятельности (к которым относятся выручка за грузовые, пассажирские и пригородные перевозки, млн руб/год) и расходами на организацию перевозочной деятельности (к которым относятся затраты на организацию перевозок грузовых, пассажирских и пригородных поездов, выполнение работ с грузовыми вагонами, расходы по службам ДИ, Д, Т) [2].

Рассматриваемый комплекс параметров дополнен устойчивостью функционирования когнитивной карты [3–5], малоинтенсивной железнодорожной линии [6–8], который определяется по формуле:

$$\text{У} = \frac{P_i^{\leftarrow}}{n}, \tag{1}$$

где $n$ — количество концептов когнитивной карты;

$P_i^{\leftarrow}$ — степень влияния системы на каждый концепт.

$$P_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n}\sum_{j-1}^{n} d_{ij}, \tag{2}$$

где $\sum_{j-1}^{n} d_{ij}$ — сумма по строке в матрице смежности нечеткой когнитивной карты.

Предлагаемый параметр (У) позволяет оценить устойчивость функционирования МИЛ при существующих внешних условиях и ресурсах функционирования и определяется в диапазоне [0; 1]. При У = 1 система функционирования МИЛ является устойчивой. При У = 0 система функционирования МИЛ является неустойчивой.

Зависимая переменная — финансовый результат МИЛ, характеризуется набором из двадцати переменных. Необходимо определить значения переменных при условии, чтобы финансовый результат был положительным. Для решения задачи планирования применен регрессионный анализ.

Финансовый результат функционирования МИЛ является зависимой переменной. Независимыми переменными функционирования МИЛ являются: длина участка, км; система СЦБ; размеры грузовых, пассажирских и пригородных поездов; грузонапряженность, млн т-км брутто/км; количество грузовых вагонов, ед/сут.; количество пассажиров, чел/сут.; количество рабочих по службам ДИ, Д, Т, чел.; расходы по службам ДИ, ДИ, Д, Т, млн руб/год; устойчивость функционирования МИЛ.

Модель регрессионного анализа можно представить в виде:

$$y(F) = a_n\beta_n + \varepsilon, \tag{3}$$

где $y(F)$ — зависимая переменная финансового результата МИЛ;

$a_n$ — независимые переменные;

$\beta_n$ — коэффициент регрессии;

$\varepsilon$ — ошибка регрессии.

Регрессионный анализ позволяет определить коэффициенты для каждой независимой переменной и учитывать влияние нескольких факторов на зависимую переменную, что делает его гибким инструментом анализа данных.

Таким образом, требуется найти значение переменной финансового результата $y(F)$ при влиянии на него ряда независимых переменных $a_{1...n}$ с учетом коэффициента регрессии:

$$\begin{aligned} y(F) = {} & a_1\beta_1 + a_2\beta_2 + a_3\beta_3 + a_4\beta_4 + a_5\beta_5 + \\ & + a_6\beta_6 + a_7\beta_7 + a_8\beta_8 + a_9\beta_9 + a_{10}\beta_{10} + a_{11}\beta_{11} + \\ & + a_{12}\beta_{12} + a_{13}\beta_{13} + a_{14}\beta_{14} + a_{15}\beta_{15} + a_{16}\beta_{16} + \\ & + a_{17}\beta_{17} + a_{18}\beta_{18} + \varepsilon, \end{aligned} \tag{4}$$

где $a_1$ — длина участка МИЛ, км;

$a_2$ — система СЦБ;

$a_3$ — грузовые поезда;

$a_4$ — пассажирские поезда;

$a_5$ — пригородные поезда;

$a_6$ — грузонапряженность, млн т-км брутто/км;

$a_7$ — количество грузовых вагонов, ед/сут.;

$a_8$ — количество пассажиров чел/сут.;

$a_9$ — количество рабочих по службе ДИ, чел.;

$a_{10}$ — количество рабочих по службе Д, чел.;

$a_{11}$ — количество рабочих по службе Т, чел.;

$a_{12}$ — расходы по службе ДИ, млн руб/год;

$a_{13}$ — расходы по службе Д, млн руб/год;

$a_{14}$ — расходы по службе Т, млн руб.;

$a_{15}$ — выручка за грузовые перевозки, млн руб/год;

$a_{16}$ — выручка за пассажирские перевозки, млн руб/год;

$a_{17}$ — выручка за пригородные перевозки, млн руб/год;

$a_{18}$ — устойчивости функционирования когнитивной карты малоинтенсивного участка;

$\beta_n$ — коэффициент регрессии;

$\varepsilon$ — ошибка регрессии.

Направлениями развития регрессионного анализа для исследования малоинтенсивных железнодорожных линий являются:

1. Использование методов определения важности переменных для сокращения их количества и упрощения модели.

2. Учет нелинейных, полиномиальных и логистических зависимостей в модели.

3. Использование методов управления сложностью модели и уменьшения шанса переобучения.

4. Использование алгоритмов машинного обучения для построения моделей с большим количеством переменных или для работы с неструктурированными данными.

В работе использовано четверное направление усовершенствования регрессионного анализа — по причине большого количества переменных (20 переменных) и большого количества наблюдений (более 600).

## 2. Нейросетевая модель функционирования МИЛ

Предлагается применение нейронных сетей для регрессионного анализа задачи планирования и моделирования зависимости между входными независимыми переменными и непрерывной зависимой переменной финансового результата МИЛ.

Для нейронной сети применена архитектура прямого распространения (рис. 1). Она состоит из входного слоя, скрытых слоев и выходного слоя. Каждый слой содержит нейроны, которые принимают входные данные, обрабатывают их и передают результаты следующему слою.

Нейронная сеть обучается на основе набора данных, которые содержат входные переменные и соответствующие значения целевого выхода. При обучении происходит корректировка весов и смещений нейронов с целью минимизации ошибки между прогнозируемым и фактическим выходом. Использована функция активации для внесения нелинейности в модель, позволяющая нейронной сети обрабатывать сложные нелинейные зависимости между входными и выходными данными.

После успешного обучения нейронная сеть может использоваться для планирования значений выходной переменной на новых данных, которые не использовались в процессе обучения. Таким образом, она позволяет моделировать зависимость и делать прогнозы на основе входных данных.

Для использования нейронных сетей в регрессионном анализе предложены следующие этапы:

1. Входные данные предварительно обработаны и нормализованы.

2. Определена архитектура сети. Выбрано количество скрытых слоев и количество нейронов в каждом слое. Количество скрытых слоев и

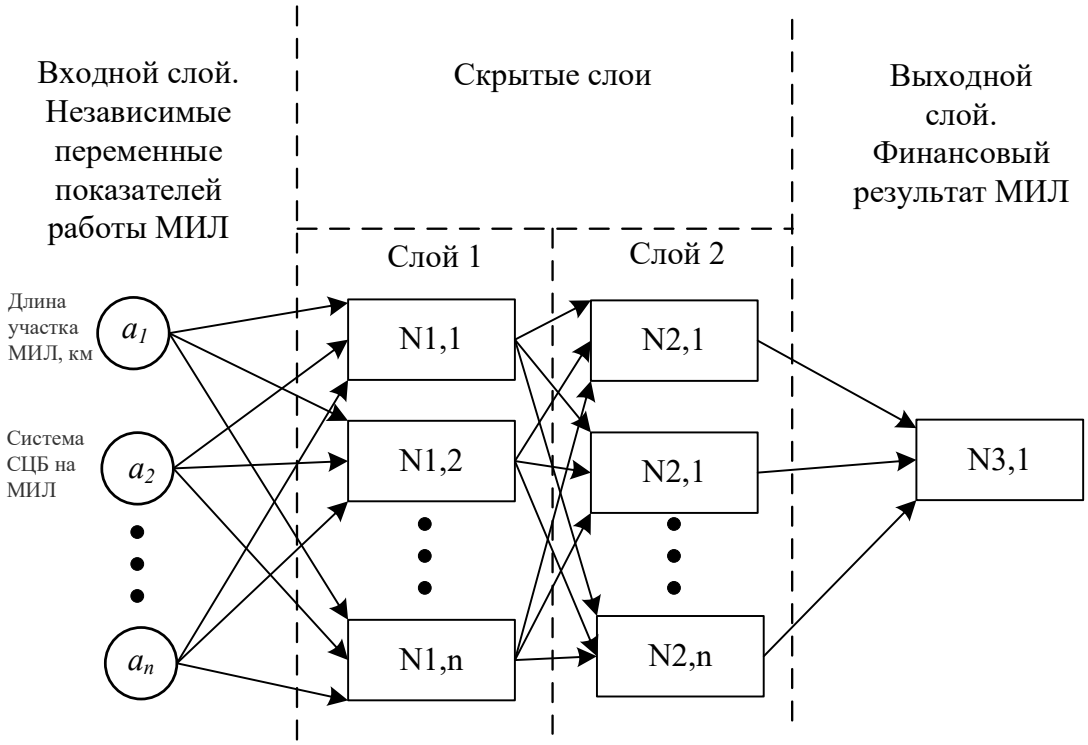



Рис. 1. Архитектура прямого распространения нейронной сети

нейронов определено на основе экспериментов с моделями для получения наибольшей достоверности.

3. Выбрана среднеквадратическая ошибка в качестве функции потерь и стохастический градиентный спуск в качестве оптимизатора для обновления весов и смещения сети с целью минимизации функции потерь.

4. Обучена нейронная сеть на обучающих данных путем подачи входных переменных и соответствующих выходных значениях. Обучение происходит путем итеративного обновления весов и смещений сети.

5. Выполнена оценка достоверности модели на тестовых данных для проверки ее производительности.

6. Разработаны сценарии моделирования для планирования значений выходной переменной на новых данных.

Эффективность нейронной сети в регрессионном анализе зависит от размера и качества обучающего набора данных, выбора архитектуры и параметров модели, а также правильности обращения. Для достижения наилучших результатов проведены эксперименты с различными конфигурациями сети и методами оптимизации.

Разработанная нейросетевая модель построена на основе метода многократных подвыборок, так как этот метод дает наименьшее значение ошибки регрессии. Модель построена из нескольких слоев нейронов, имеющих случайный размер подвыборок для обучающей (70 %), контрольной (15 %) и тестовой (15 %). Количество обучающихся подвыборок составляет пять. В скрытом слое используются от 3 до 10 слоев. На скрытом и выходном слое используются тождественные, логистические, гиперболические и экспоненциальные функции активации, поскольку неизвестна взаимосвязь между независимыми переменными.

Разработано 15 моделей машинного обучения (табл. 1). В таблице представлены наиболее важные характеристики моделей, к которым относятся контрольная производительность, тестовая производительность, валидация, ошибка обуче-

ТАБЛИЦА 1. Результаты моделей машинного обучения

| Номер модели сети | Контрольная производительность | Тестовая производительность | Валидация | Ошибка обучения | Функция активации скрытого слоя | Функция активации выходного слоя |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,997 | –0,780 | 0,970 | 465,19 | тождественная | экспоненциальная |
| 2 | 0,889 | 0,978 | –0,079 | 28509,56 | тождественная | экспоненциальная |
| 3 | 0,998 | 0,946 | 0,992 | 391,77 | тождественная | экспоненциальная |
| 4 | 1,000 | 0,962 | 0,985 | 87,82 | тождественная | экспоненциальная |
| 5 | 0,989 | 0,999 | 0,878 | 662,71 | тождественная | экспоненциальная |
| 6 | 0,941 | 0,901 | 0,998 | 2690,65 | тождественная | экспоненциальная |
| 7 | 0,999 | 0,995 | 0,708 | 364,31 | тождественная | экспоненциальная |
| 8 | 0,996 | 0,878 | 0,665 | 1089,45 | тождественная | экспоненциальная |
| 9 | 0,998 | 0,991 | 0,928 | 414,39 | тождественная | экспоненциальная |
| 10 | 0,996 | 0,957 | –0,045 | 927,81 | тождественная | экспоненциальная |
| 11 | 0,849 | 0,915 | 0,969 | 6470,15 | тождественная | экспоненциальная |
| 12 | 0,998 | 0,963 | –0,749 | 458,52 | тождественная | экспоненциальная |
| 13 | 1,000 | 0,999 | –0,646 | 0,20 | тождественная | экспоненциальная |
| 14 | –0,017 | 0,315 | 0,754 | 29626,84 | тождественная | экспоненциальная |
| 15 | 0,998 | 0,796 | 0,433 | 614,44 | тождественная | экспоненциальная |

ния, функция активации скрытого слоя, функция активации выходного слоя.

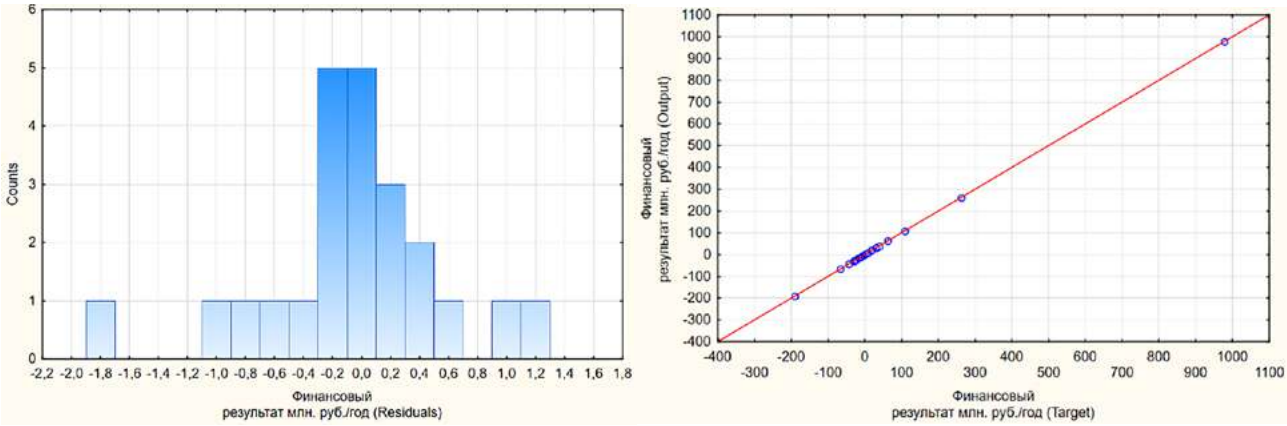
На основе выбранной с наилучшими параметрами нейросетевой модели под номером 13 определена степень значимости независимых переменных (табл. 2). Для анализа вклада каждой независимой переменной в изменения выходного значения нейросетевой модели применен метод вкладов, который определяет влияние каждой независимой переменной на изменение выходного значения. Для этого последовательно исключались переменные для оценки влияния на качество модели. В случае когда, при исключении переменной качество модели значительно ухудшается, то данная переменная имеет высокую степень значимости в планировании работы МИЛ.

Из табл. 2 видно, что наибольшую значимость имеют переменные выручки за грузовые и пассажирские перевозки, которые регулируются тарифами на перевозки грузов [9]. При этом переменные количества грузовых, пассажирских и пригородных поездов имеют значимость 6, 3 и 10 соответственно. Переменная грузонапряженности, по которой линию классифицируют как малоинтенсивную, имеет значимость переменной 12.

ТАБЛИЦА 2. Степень значимости независимых переменных

| № | Переменные | Значимость переменной | № | Переменные | Значимость переменной |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $a_{15}$ | 229,8 | 11 | $a_2$ | 4,4 |
| 2 | $a_{16}$ | 141,6 | 12 | $a_6$ | 2,6 |
| 3 | $a_4$ | 116,8 | 13 | $a_{12}$ | 2,2 |
| 4 | $a_{10}$ | 80,9 | 14 | $a_8$ | 2,0 |
| 5 | $a_{13}$ | 71,6 | 15 | $a_{17}$ | 1,2 |
| 6 | $a_7$ | 28,2 | 16 | $a_9$ | 1,1 |
| 7 | $a_1$ | 6,2 | 17 | $a_{11}$ | 0,9 |
| 8 | $a_{19}$ | 4,6 | 18 | $a_3$ | 0,5 |
| 9 | $a_{14}$ | 4,4 | 19 | $a_6$ | 0,3 |
| 10 | $a_5$ | 4,6 | | | |

Установлено, что наибольшее влияние на финансовый результат функционирования МИЛ оказывают переменные: выручка за грузовые перевозки; выручка за пассажирские перевозки; пассажирские поезда; количество рабочих по службе Д; расходы по службе Д. Перечисленные




*а* *б*

Рис. 2. Оценки качества модели финансового результата функционирования МИЛ:
*а* — распределение остатков финансового результата функционирования МИЛ;
*б* — сравнение входных и выходных переменных модели

переменные будут предметом дальнейших исследований в части разработки процедур стимулирования к перевозочной деятельности с использованием МИЛ.

На основании выражения (4) и проведенных исследований значение переменной финансового результата МИЛ $y(F)$ примет вид:

$$y(F) = a_1 \cdot 6,2 + a_2 \cdot 4,5 + a_3 \cdot 2,2 + a_4 \cdot 116,8 + \\ + a_5 \cdot 2,6 + a_6 \cdot 2,0 + a_7 \cdot 28,2 + a_8 \cdot 1,1 + a_9 \cdot 1,1 + \\ + a_{10} \cdot 80,9 + a_{11} \cdot 0,9 + a_{12} \cdot 2,2 + a_{13} \cdot 71,6 + \\ + a_{14} \cdot 4,4 + a_{15} \cdot 229,8 + a_{16} \cdot 141,6 + a_{17} \cdot 1,2 + \\ + a_{18} \cdot 4,6 + a_{19} \cdot 4,6 + 0,01.$$

Переменные, имеющие большое значение коэффициентов регрессии, будут предметом дальнейших исследований в части разработки процедур стимулирования к перевозочной деятельности с использованием МИЛ.

## 3. Оценка адекватности нейросетевой модели финансового результата функционирования МИЛ

Для оценки качества модели и выявления наличия ошибок в прогнозах нейросетевой модели представлена гистограмма, в которой графическим способом представлены распределения остатков модели в виде разницы между прогнозируемыми и фактическими значениями (рис. 2, *а*). Гистограмма остатков имеет нормальное распределение и среднее значение, равное 0,00, что указывает на высокую достоверность работы модели.

Входные параметры, подающиеся на вход модели для обработки, и выходные параметры, являющиеся результатом работы модели, должны соответствовать ожидаемым значениям. Как видно из рис. 2, *б*, точки, характеризующие выходные данные, расположены на линии, что свидетельствует о высокой степени достоверности результатов.

Представлен трехмерный график зависимости финансового результата от переменных выручки за пассажирские и грузовые перевозки (рис. 3).

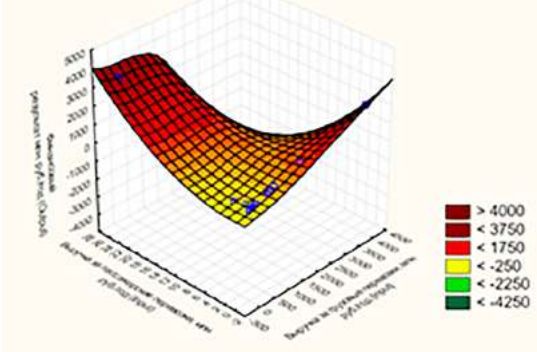



Рис. 3. Зависимость финансового результата от переменных выручки за пассажирские и грузовые перевозки

Из графика зависимости следует, что при увеличении выручки от пассажирских и грузовых перевозок наблюдается рост финансового результата функционирования МИЛ.

Проверка обоснованности модели выполнена на основании анализа распределения остатков, сравнение входных и выходных переменных модели свидетельствует о соответствии модели реальному процессу функционирования МИЛ.

На основании моделирования и проведенных исследований установлено, что размер выручки от пассажирских и грузовых перевозок имеет большую степень важности для финансового результата функционирования МИЛ, чем размеры движения поездов.

## 4. Планирование технико-эксплуатационных параметров МИЛ

Рассмотрим пример планирования технико-эксплуатационных и финансовых характеристик участков МИЛ на примере статистических данных, представленных на рис. 4.

Из набора данных выберем участок под номером 11, так как он имеет отрицательный финансовый результат, наиболее близкий к нулю, из всех имеющихся участков. Участок 11 имеет следующие параметры за предшествующий период (табл. 3).

Рассматриваемая МИЛ имеет отрицательный финансовый результат в размере 1 млн руб/год за предшествующий период. Инструментарий процедуры планирования реализован на основе пакета Statistica.

Data: Исходные данные статистикиМИЛ* (20v by 31c)

| | 1 Длина, км | 2 Система СЦБ | 3 Грузовых поездов | 4 Пассажирских поездов | 5 Пригородных поездов | 6 Грузонапряженность, млн. ткм брутто/км | 7 Количество грузовых вагонов, ед./сут. | 8 Количество пассажиров чел./сут. | 9 Количество рабочих по службе ДИ, чел. | 10 Количество рабочих по службе Д, чел. | 11 Количество рабочих по службе Т, чел. | 12 Расходы по службе ДИ, млн руб./год | 13 Расходы по службе Д, млн руб./год | 14 Расходы по службе Т, млн руб./год | 15 Выручка за грузовые перевозки, млн руб./год | 16 Выручка за пассажирские перевозки, млн руб./год | 17 Выручка за пригородные перевозки, млн руб./год | 18 Финансовый результат млн. руб./год | 19 Финансовый результат | 20 Устойчивость функционирования когнитивной карты |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 48 | ПАБ | 0,1 | 0 | 1 | 0,1 | 3 | 32,9 | 8,4 | 28 | 14 | 11,2 | 21,3 | 15,3 | 33 | 0 | 4,5 | -9 | отрицательный | 0,2 |
| 2 | 148 | ПАБ | 0,2 | 0,09 | 1,8 | 0,3 | 8,7 | 80,5 | 55 | 52 | 32,3 | 34,8 | 22,3 | 14,1 | 106 | 1,2 | 7,7 | -4 | отрицательный | 0,1 |
| 3 | 97 | ПАБ | 0,02 | 0 | 2,2 | 0,4 | 4 | 29,9 | 10 | 29 | 4,5 | 15,6 | 9,9 | 15,7 | 80 | 0 | 17 | 1,9 | положительный | 0,3 |
| 4 | 31 | ПАБ | 1 | 0 | 0 | 1,02 | 85 | 0 | 32,2 | 63 | 56 | 42,3 | 54,5 | 45,2 | 3927 | 0 | 0 | 2221 | положительный | 1 |
| 5 | 99 | ЭЖД | 0,01 | 0 | 0 | 0,04 | 2 | 0 | 23,8 | 5 | 3 | 31,7 | 3,8 | 6 | 30,4 | 0 | 0 | -27,4 | отрицательный | 0,1 |
| 6 | 160 | ПАБ | 1 | 0 | 0 | 1,13 | 26,6 | 0 | 63,5 | 76 | 41 | 108 | 70 | 16,3 | 581 | 0 | 0 | 263 | положительный | 0,1 |
| 7 | 31 | ПАБ | 1,6 | 0 | 0 | 2,27 | 77,2 | 0 | 9,8 | 27 | 11 | 12,4 | 18,2 | 8,3 | 1684 | 0 | 0 | 977 | положительный | 1 |
| 8 | 26 | ПАБ | 0,8 | 0 | 0 | 0,87 | 24 | 0 | 7,8 | 27 | 10 | 9,9 | 18,2 | 11 | 638 | 0 | 0 | 233 | положительный | 1 |
| 9 | 103 | ПАБ | 0,03 | 0 | 0,03 | 0,04 | 6 | 4 | 17,3 | 5 | 1,4 | 14,4 | 2,8 | 4,4 | 98 | 0 | 1 | 39 | положительный | 0,4 |
| 10 | 30 | ПАБ | 1,07 | 0 | 0 | 1,58 | 44 | 0 | 8,2 | 43 | 30 | 14 | 19 | 38,6 | 639 | 0 | 0 | 31 | положительный | 0,5 |
| 11 | 18 | ПАБ | 0,1 | 0 | 0 | 0,05 | 4 | 0 | 6,2 | 4 | 7 | 8 | 3,9 | 1,8 | 67 | 0 | 0 | -1 | отрицательный | 0,1 |
| 12 | 6 | ПАБ | 0,6 | 0 | 0 | 0,81 | 19 | 0 | 2 | 10 | 0,1 | 2,3 | 4,6 | 1,1 | 779 | 0 | 0 | 572 | положительный | 1 |
| 13 | 26 | ПАБ | 1,3 | 0 | 0 | 1,92 | 4,3 | 0 | 3,7 | 19 | 11,3 | 17,2 | 7,9 | 13 | 183 | 0 | 0 | 109 | положительный | 0,8 |

Рис. 4. Фрагмент технико-эксплуатационных и финансовых характеристик участков МИЛ

ТАБЛИЦА 3. Параметры функционирования МИЛ (в соответствии с [1])

| Участок | Переменные | Участок | Переменные |
|---|---|---|---|
| Длина, км | 18 | Количество рабочих по службе Т, чел. | 7 |
| Система СЦБ | ПАБ | Расходы по службе ДИ, млн руб/год | 8 |
| Грузовых поездов | 0,1 | Расходы по службе Д, млн руб/год | 3,9 |
| Пассажирских поездов | 0 | Расходы по службе Т, млн руб/год | 1,8 |
| Пригородных поездов | 0 | Выручка за грузовые перевозки, млн руб/год | 67 |
| Грузонапряженность, млн ткм брутто/км | 0,05 | Выручка за пассажирские перевозки, млн руб/год | 0 |
| Количество грузовых вагонов, ед/сут. | 4 | Выручка за пригородные перевозки, млн руб/год | 0 |
| Количество пассажиров, чел/сут. | 0 | Устойчивость функционирования когнитивной карты | 0,1 |
| Количество рабочих по службе ДИ, чел. | 6,2 | Финансовый результат, млн руб/год | –1 |
| Количество рабочих по службе Д, чел. | 4 | | |

ТАБЛИЦА 4. Анализ полученных результатов моделирования сценариев функционирования МИЛ

| Переменные | Сценарий 1 | Сценарий 2 | Сценарий 3 | Сценарий 4 |
|---|---|---|---|---|
| Длина, км | 17,0 | 18,0 | 18,0 | 18,0 |
| Грузовых поездов, ед/сут. | 0,1 | 0,6 | 0,9 | 0,8 |
| Пассажирских поездов, ед/сут. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Пригородных поездов, ед/сут. | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Грузонапряженность, млн т-км брутто/км | 0,1 | 0,1 | 0,9 | 0,1 |
| Количество грузовых вагонов, ед/сут. | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| Финансовый результат млн руб/год | –35,93 | –7,14 | –27,88 | 0,04 |

| Cases | Custom predictions spreadsheet (Исходные данные статистикиМИЛ) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 13.Финансовый результат млн. руб./год_(t) | Длина, км | Грузовых поездов | Пассажирских поездов | Пригородных поездов | Грузонапряженность, млн. ткм брутто/км | Количество грузовых вагонов, ед./сут. |
| 1 | -35,9266 | 17,00000 | 0,100000 | 0,00 | 0,00 | 0,050000 | 4,000000 |
| 2 | -7,1401 | 18,00000 | 0,600000 | 0,00 | 0,00 | 0,070000 | 4,000000 |
| 3 | -27,8832 | 18,00000 | 0,900000 | 0,00 | 0,00 | 0,900000 | 4,000000 |
| 4 | 0,0361 | 18,00000 | 0,800000 | 0,00 | 0,00 | 0,070000 | 4,000000 |

Рис. 5. Фрагмент полученных результатов моделирования

Разработан набор сценариев с изменением параметров переменных для получения планового положительного финансового результата табл. 4.

Представленные сценарии реализованы в программном комплексе, и получены следующие результаты моделирования (рис. 5).

Анализ результатов моделирования по сценарию 1 законсервирования одного километра станционных путей установлено снижение финансового результат функционирования МИЛ до –35,93 млн руб/год.

При реализации сценария 2, увеличении количества грузовых поездов на 0,5 поездов/сут. финансовый результата функционирования МИЛ составит –7,14 млн руб/год.

При реализации сценария 3, увеличении количества грузовых поездов на 0,8 поездов, поездов/сут. и увеличении грузонапряженности на 0,8 млн т-км брутто/км финансовый результат функционирования МИЛ составит –27,88 млн руб/год.

При реализации сценария 4, увеличении количества грузовых поездов на 0,7 поездов, поездов/сут. финансовый результат функционирования МИЛ составит 0,04 млн руб/год.

**Заключение**

В работе на основе статистических данных и предложенного параметра устойчивости функционирования когнитивной карты функционирования МИЛ сформулирована задачи регрессионного множественного анализа финансового результата.

Разработан набор нейросетевых моделей функционирования на основе логистических аспектов деятельности МИЛ, а именно в качестве управленческих аспектов рассмотрены количество рабочих по службам (ДИ, Д, Т), устойчивости функционирования когнитивной карты малоинтенсивного участка. К технологическим аспектам отнесены размеры пассажирских, пригородных и грузовых поездов, грузонапряженность, количество вагонов с грузовыми операциями. К техническим аспектам отнесены система СЦБ и длина участка МИЛ. К экономическим аспектам расходы по службам (ДИ, Д, Т) и выручка за пассажирские, пригородные и грузовые перевозки.

Определена модель с наибольшей степенью достоверности результатов по параметрам контрольной производительности, тестовой производительность, вариации и ошибки обучения. На

основании выбранной модели определена степень важности независимых переменных.

Установлено, что наибольшее влияние на финансовый результат функционирования МИЛ оказывают переменные: выручка за грузовые перевозки; выручка за пассажирские перевозки; количество пассажирских поездов; количество работников по службе Д; расходы по службе Д.

Выполнена оценка адекватности нейросетевой модели финансового результата функционирования МИЛ с использованием графического способа распределения остатков модели, в виде разницы между прогнозируемыми и фактическими значениями базисной переменной, а также на основе трехмерного графика зависимости финансового результата от переменных выручки за пассажирские и грузовые перевозки.

Разработан набор сценариев и установлено, что увеличение количества грузовых поездов на 0,7 поездов/сут., даст положительный финансовый результат функционирования МИЛ в размере 0,04 млн руб/год.

Направлениями дальнейших исследований является определение параметров переменных, оказывающих наибольшее влияние на финансовый результат функционирования МИЛ и разработка процедур стимулирования к выполнению плановых показателей переменных.

## Библиографический список

1. Никитин А. Б. Новый подход к организации движения поездов на малодеятельных линиях ОАО «РЖД» / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль, И. М. Кокурин и др. // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 4. — С. 561–579.

2. Приказ Минфина России от 6 мая 1999 г. № 32н (ред. от 27 ноября 2020 г.) «Об утверждении Положения по бухгалтерскому учету “Доходы организации” ПБУ 9/99» (зарегистрировано в Минюсте России 31 мая 1999 г. № 1791).

3. Кульба В. В. Управление и контроль реализации социально-экономических программ / В. В. Кульба, С. С. Ковалевский. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 400 с.

4. Новичихин А. В. Когнитивное моделирование для диагностики социально-экономических систем топливно-сырьевого региона / А. В. Новичихин, В. Н. Фрянов // Экономика и менеджмент систем управления. — 2014. — № 2. — С. 72–83.

5. Микрин Е. А. Синтез оптимальных распределенных модульных систем обработки данных реального времени / Е. А. Микрин, В. В. Кульба, С. К. Сомов. — М.: ИПУ РАН, 2012. — 160 с.

6. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267.

7. Kovalev K. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models / K. Kovalev, A. Novichikhin // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402 LNNS. — С. 701–709. — DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_76.

8. Ковалев К. Е. Механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе нечеткого когнитивного моделирования / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, И. Л. Сакович и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 72–86.

9. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами (утв. постановлением ФЭК РФ от 17 июня 2003 г. № 47-т/5). — 463 с.

Дата поступления: 14.05.2023
Решение о публикации: 31.05.2023

**Контактная информация:**

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук; kovalev@pgups.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доц.; novitchihin@bk.ru

# The Procedure for Planning the Operation of Low-Intensity Railway Lines: Logistical Aspects and Neural Network Models

**K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin**

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

**For citation:** Kovalev K. E., Novichikhin A. V. The Procedure for Planning the Operation of Low-Intensity Railway Lines: Logistical Aspects and Neural Network Models // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 325–335. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-325-335

**Summary**
**Purpose:** Improving the efficiency of the line functioning based on the development of a procedure for planning the operation of low-intensity railway lines based on neural networks. **Methods:** Methods of analysis, synthesis, machine learning, neural network modeling have been applied. **Results:** Using regression multiple analysis and mathematical tools, a set of neural network models for planning the operation of a low-intensity railway line according to a set of indicators has been developed. Planning parameters have been determined, which enable the railway line operations to achieve a positive financial outcome. **Practical significance:** The conducted research is an effective tool for improving the planning of the work of low-intensity railway lines.

**Keywords:** Low-intensity railway lines, work planning, machine learning, regression analysis, neural networks.

## References

1. Nikitin A. B., Kushpil I. V., Kokurin I. M. et al. Novyy podkhod k organizatsii dvizheniya poezdov na malodeyatel'nykh liniyakh OAO "RZhD" [A new approach to the organization of train traffic on low-traffic lines of Russian Railways]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2018, vol. 4, Iss. 4, pp. 561–579. (In Russian)

2. *Prikaz Minfina Rossii ot 6 maya 1999 g. № 32n (red. ot 27 noyabrya 2020 g.) "Ob utverzhdenii Polozheniya po bukhgalterskomu uchetu "Dokhody organizatsii" PBU 9/99" (zaregistrirovano v Minyuste Rossii 31 maya 1999 g. № 1791)* [Order of the Ministry of Finance of Russia dated May 6, 1999 No. 32n (as amended on November 27, 2020) "On Approval of the Regulation on Accounting "Income of an Organization" PBU 9/99" (registered with the Ministry of Justice of Russia on May 31, 1999 № 1791)]. (In Russian)

3. Kulba V. V., Kovalevsky S. S. *Upravlenie i kontrol' realizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh program* [Management and control of the implementation of socio-economic programs]. Moscow: Knizhnyy dom "LIBROKOM" Publ., 2009, 400 p. (In Russian)

4. Novichikhin A. V., Fryanov V. N. Kognitivnoe modelirovanie dlya diagnostiki sotsial'no-ekonomicheskikh sistem toplivno-syr'evogo regiona [Cognitive modeling for diagnostics of socio-economic systems of the fuel and raw material region]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya* [Economics and management of control systems]. 2014, Iss. 2, pp. 72–83. (In Russian)

5. Mikrin E. A., Kul'ba V. V., Somov S. K. *Sintez optimal'nykh raspredelennykh modul'nykh sistem obra-botki dannykh real'nogo vremeni* [Synthesis of optimal distributed modular systems for real-time data processing]. Moscow: IPU RAN Publ., 2012, 160 p. (In Russian)

6. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Complex synergetic-indicator approach to the management of transportation processes on intensive and low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2021, vol. 7, Iss. 2, pp. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267. (In Russian)

7. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models.

Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, vol. 402 LNNS, pp. 701–709. DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_76.

8. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Sakovich I. L. Mekhanizm diagnostiki ekspluatatsii malointensivnykh zhelez-nodorozhnykh liniy na osnove nechetkogo kognitivnogo modelirovaniya [The mechanism for diagnosing the operation of low-intensity railway lines based on fuzzy cognitive modeling]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 72–86. (In Russian)

9. *Preyskurant № 10-01. Tarify na perevozku gruzov i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami (utv. postanovleniem FEK RF ot 17 iyunya 2003 g. № 47-t/5)* [Price list № 10-01. Tariffs for the transportation of goods and infrastructure services performed by Russian railways (approved by the Decree of the Federal Energy Commission of the Russian Federation dated June 17, 2003 No. 47-t / 5)]. 463 p. (In Russian)

Received: May 14, 2023
Accepted: May 31, 2023

**Author's information:**
Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering; kovalev@pgups.ru
Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novitchihin@bk.ru

УДК 699.8

# Создание комфортных условий эксплуатации выставочных комплексов в жарком климате

**Ж. В. Иванова, Г. А. Богданова**

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

**Для цитирования:** *Иванова Ж. В., Богданова Г. А.* Создание комфортных условий эксплуатации выставочных комплексов в жарком климате // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 336–347. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-336-347

## Аннотация

**Цель:** Рассмотреть возможность использования в ограждающих конструкциях современные инновационные материалы покрытия, в частности пленки ETFE, при проектировании общественных зданий в различных природно-климатических условиях, на примере регионов с наличием жаркого климата. **Метод:** Обобщение принципов проектирования, в том числе и в условиях жаркого климата. Анализ климатических параметров районов жаркого климата, оказывающих существенное влияние на комфортные условия пребывания людей в общественных зданиях, характеризующихся многофункциональностью, значительными размерами в пространстве, достаточно большим скоплением людей и т. д. Показать возможность обеспечения благоприятных условий пребывания людей в таких зданиях различными способами: планировочного и конструктивного характера; благоустройством прилегающих территорий; расположением самого здания. Выполнить анализ отечественного и зарубежного опыта применения средств солнцезащиты зданий. Разработать объемно-планировочные и конструктивные решения выставочного комплекса. Оценить эффективность предлагаемого решения посредством проведения расчетного исследования. **Результаты:** Представлены результаты исследования комплекса мероприятий, направленных на улучшение условий комфортного пребывания людей в выставочных комплексах. Предложено конструктивное решение солнцезащиты выставочного комплекса с учетом физико-механических свойств мембранной системы и климатических условий в районах строительства. **Практическая значимость:** Продемонстрирована универсальность применения купольных конструкций в качестве ограждающих. Показано преимущество использования инновационных покрывающих материалов как альтернатива традиционным материалам.

**Ключевые слова:** Жаркий климат, выставочный комплекс, микроклимат, солнцезащита, купольные конструкции, мембранная система.

Как показывает мировая практика, проектирование и строительство зданий и сооружений приходится вести в регионах со сложными природно-климатическими условиями. Для этих районов характерны явно выраженная высокая влажность воздуха, высокие ветровые нагрузки, относительно низкие и высокие температуры воздуха и т. д. [1]. Все это оказывает существенное влияние как на функционально-пространственную организацию и архитектуру зданий различного назначения, так и на выбор строительных конструкций и материалов. К таким районам относятся районы с жарким климатом, климатические характеристики которых оказывают отрицательное воздействие на общее состояние человека и требуют специальных мер по обеспечению комфортных условий пребывания людей в помещениях зданий. Продолжающиеся в

последнее время глобальные изменения климата в сторону потепления также приводят к негативным последствиям различного характера и, как следствие, к созданию проблем во всех сферах деятельности человека [2, 3]. В этой связи правильный учет климатических условий площадки строительства при проектировании зданий позволяет не только сократить капитальные и эксплуатационные расходы, но и улучшить микроклимат помещений и открытых пространств.

Таким образом, одной из главных проблем проектирования зданий является создание комфортных условий пребывания людей, особенно в местах их набольшего скопления в различных климатических условиях и, в частности, в районах жаркого климата.

На территории РФ, согласно действующим нормам СП 131.13330.2020 «Строительная климатология СНиП 23-01—99», к таким районам относят районы III и IV климатических зон, отличительными чертами которых являются:

– высокая солнечная радиационная нагрузка;

– температурные перепады в летний и зимний периоды;

– неблагоприятные влажностные условия;

– частота и интенсивность ветров и осадков.

Разнообразие физико-географических и климатических районов привело к выработке общих принципов проектирования зданий и сооружений и, в частности, в условиях жаркого климата, которые представлены в различных источниках [4–13]. Однако стоит отметить, что при проектировании зданий в данных условиях наряду с общепринятыми требованиями (функционального, технического и экономического характера) большое значение имеет правильность выбора защиты конструкций зданий от повышенной солнечной радиации. Поскольку воздействие солнечной радиации, с одной стороны, приводит к перегреву помещений и в результате вызывает значительные тепловые нагрузки на организм человека и существенно понижает его работоспособность либо ослепляет отраженным светом находящихся в нем людей, а с другой — ускоряет процесс старения материалов за счет деструкции облицовочных материалов, красок и т. д. Таким образом, при проектировании зданий в неблагоприятных условиях при наличии большой солнечной радиации требуется наличие дополнительных средств защиты зданий от солнца [14–18].

На сегодняшний день применяются различные солнцезащитные устройства, которые разделяются по функциональным показателям: по месту установки, ориентации ламелей, способам управления, материалам изготовления и т. д. Наибольшее распространение получили наружные стационарные солнцезащитные устройства (СЗУ) в виде горизонтальных козырьков, также встречается сочетание горизонтальных козырьков с вертикальными ребрами-экранами, которые являются комбинированными СЗУ.

В последнее время для повышения эффективности при проектировании в мировой практике используют комплекс архитектурных и инженерных мероприятий, направленных на решение сразу нескольких задач. С одной стороны, это существенное снижение энергетических затрат, связанных с теплоснабжением зданий, а с другой — улучшение комфортного режима помещений. Ниже представлены некоторые варианты разнообразных концептуальных решений систем двойных фасадов (рис. 1–4) [19–21].

На протяжении последних десятилетий все чаще в практике строительства находят применение комбинированные строительные конструкции, выполняющие двойную функцию — ограждающих конструкций и солнцезащитного экрана. Так, одним из наиболее востребованных материалов, применяемых при устройстве ограждающих конструкций зданий и сооружений, являются светопрозрачные материалы.

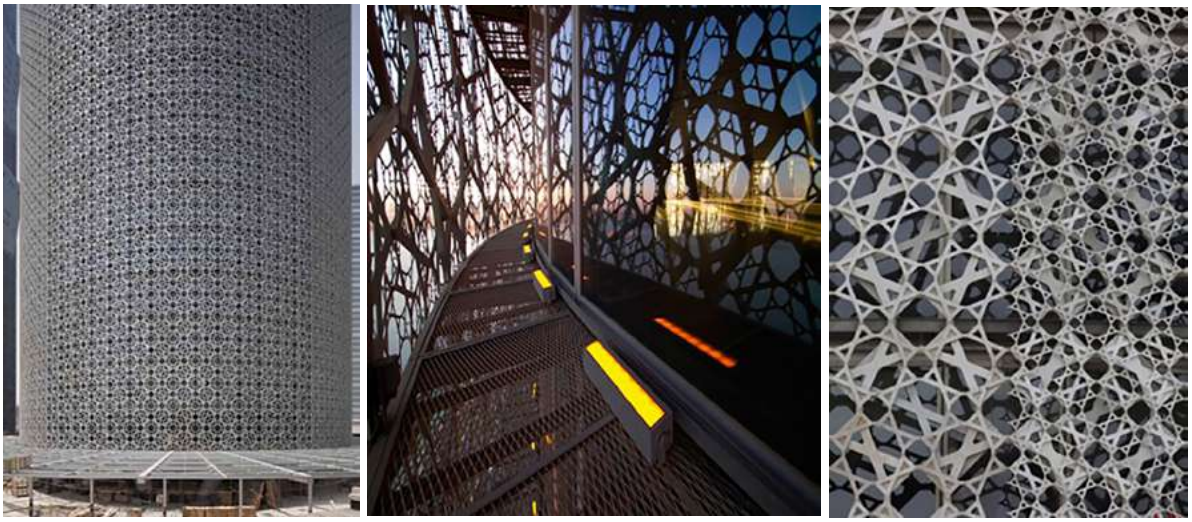


Рис. 1. Внешние экранные модули в фасаде башни Burj Doha [19]

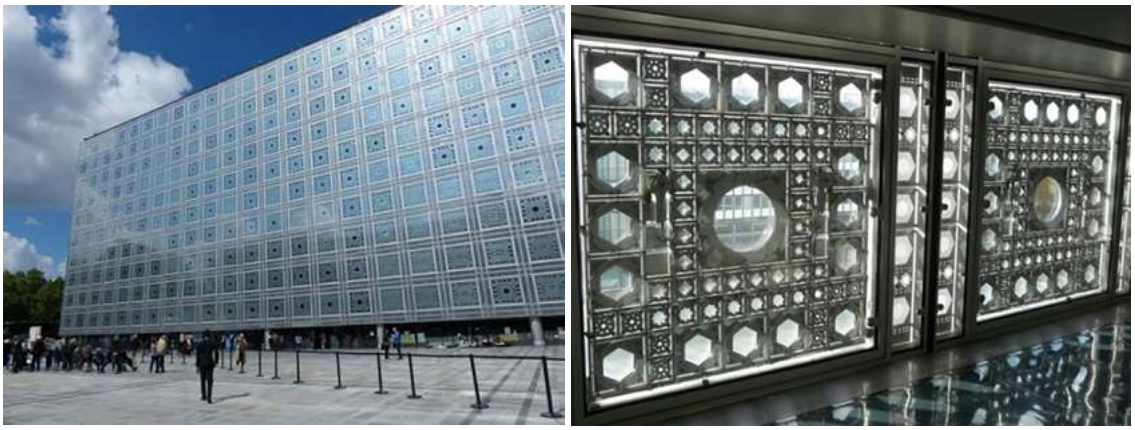


Рис. 2. Кинетический фасад южной стены Института арабского мира и вид фотоэлектрических экранов, напоминающих арабские узоры решетчатых ширм [19]

Использование мембранных многослойных подушек из пленки ETFE позволяет создавать сложные по форме сооружения, имеющие особую архитектурную выразительность и свободную планировку. Примерами таких сооружений могут служить национальный аквапарк «Водный куб» в Пекине, энергосберегающий надувной дом в Барселоне (рис. 5) и др. [22, 23].

Однако стоит отметить, что большинство конструкций, которые выполняют защитные функции, в большей степени находят свое применение в зарубежной практике проектирования и строительства и мало адаптированы к российской действительности.

В настоящее время в рамках реализации принятой концепции развития и обновления регионов Российской Федерации немаловажную роль играет выставочная деятельность [24]. Одним из основных условий проектирования выставочных комплексов, как показывает практика, является учет современных особенностей функционально-планировочной структуры данных комплексов, затрагивающих такие вопросы, как универсальность, компактность, мобильность, комплексность, доступность и др. Во многих субъектах Российской Федерации наблюдается увеличение строительства выставочных комплексов. Однако не все они современны и отвечают требованиям

Рис. 3. Общий вид башен Al Bahar и вид устройства двойного фасада [20]

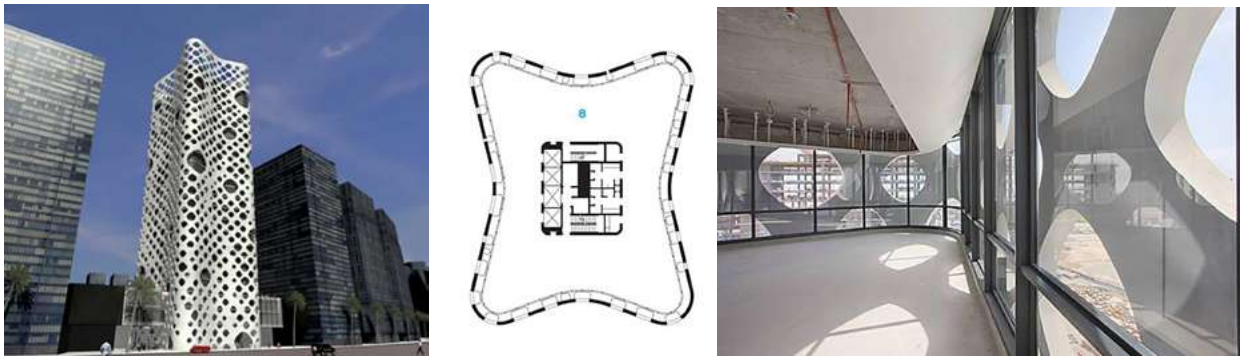


Рис. 4. Внешний вид перфорированного диагонального экзоскелета башни O-14. Типовой план башни в центре, показывающий пространство между наружным и внутренним остекленными фасадами. Справа — вид интерьера офиса, демонтирующий полное остекление внутреннего слоя двойного фасада [21]

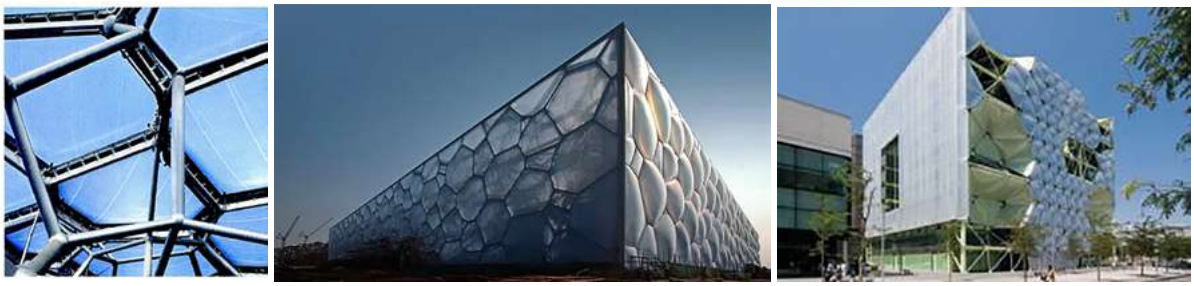


Рис. 5. Пекинский национальный плавательный комплекс «Водный куб» (Китай) и энергосберегающий дом, Барселона (Испания) [22]

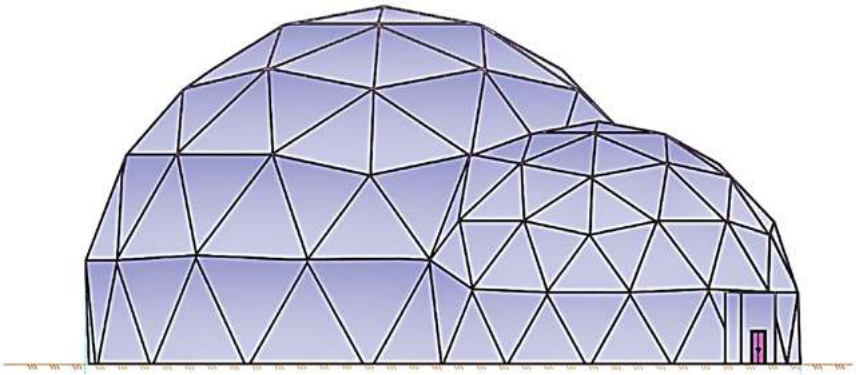


Рис. 6. Главынй фасад выставочного комплекса

единой функциональности, планировочной и конструктивной целостности, архитектурной выразительности, а в некоторых и вовсе отсутствуют.

Таким образом, проектирование зданий различного назначения в районах распространения жаркого климата должно вестись с учетом архитектурно-планировочной организации и влияния климатических факторов на формирование благоприятных условий для длительного пребывания в них людей.

В данной статье приводятся некоторые результаты исследования общественного здания при строительстве в условиях сухого и жаркого климата с учетом существующей практики проектирования.

За объект исследования был принят выставочный комплекс, предназначенный для проведения выставочно-ярмарочных мероприятий. В качестве предполагаемого места строительства рассматривался г. Элиста, расположенный в центральной части Республики Калмыкии. Данный район характеризуется контрастными перепадами летних и зимних температур наружного воздуха, а также засушливыми явлениями, что отрицательно сказывается на влажности воздуха из-за отсутствия достаточного количества водоемов.

При разработке объемно-планировочных решений учитывалось как функциональное наполнение и взаимосвязь помещений, так и архитектурное решение фасада (рис. 6, 7), представленного в виде светопрозрачной сетчатой купольной конструкции, выступающей как ограждающей, так и солнцезащитной конструкцией.

В строительной практике для создания панелей, в том числе и покрытия, с применением инновационного материала этилтетрафторэтилен (ETFE) получили распространение три основные конструктивные решения [25]: однослойные (растяжимые), двух- и трехслойные надувные подушки. Поэтому в данной работе в качестве заполнения прозрачной оболочки каркаса была принята мембранная система ETFE, состоящая из

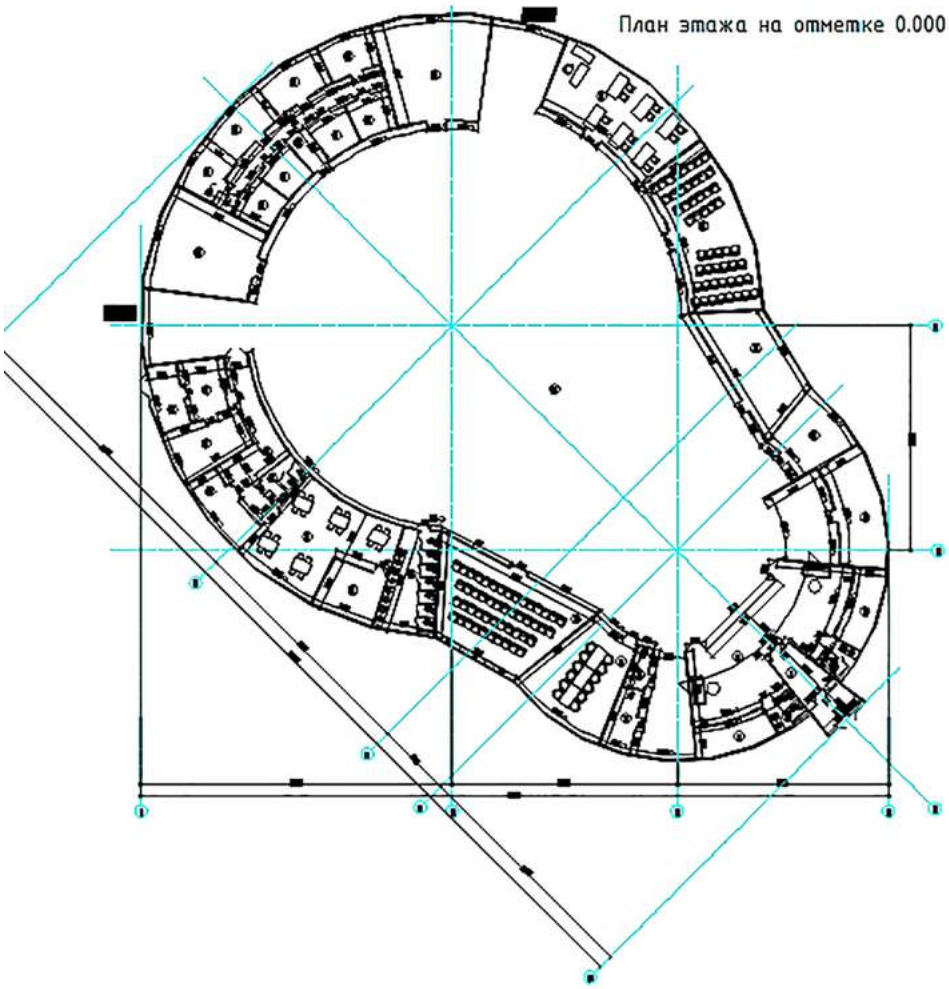



Рис. 7. План этажа рассматриваемого комплекса

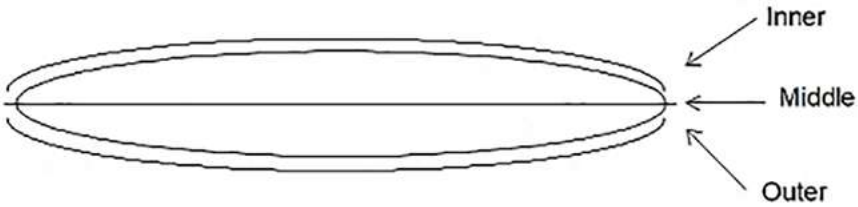



Рис. 8. Фрагмент строения инновационного мембранного материала этилтетрафторэтилен (ETFE), состоящего из внутреннего (Inner), внешнего (Outer) и среднего (Middle) слоев

трех слоев, фрагмент конструкции которой представлен на рис. 8.

Для реальной оценки эффективности применения предлагаемой конструкции выполнялся комплекс расчетных исследований, включающий в себя как теплотехнические, так и конструктивные расчеты.

С целью подбора конструкции, обеспечивающей защиту от прямых солнечных лучей на первом этапе с использованием известных методик, проводился расчет теплотехнических характеристик нескольких вариантов наружных ограждающих конструкций. Некоторые характеристики исследуемых материалов представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Теплофизические характеристики материалов

| Элементы конструкций | Толщина, м | Коэффициент теплопроводности, Вт/м °С | Коэффициент сопротивления теплопередачи, м$^2$·°С/Вт |
|---|---|---|---|
| Однокамерный стеклопакет SunGuard High Performance Silver 35-16 | 0,024 | 1,15 | 0,67 |
| Двухкамерный стеклопакет EKA SOFTLINE 70 | 0,042 | 1,06 | 0,62 |
| Этилтетрафторэтилен (ETFE) | 0,003 | 0,17 | 0,0176 |

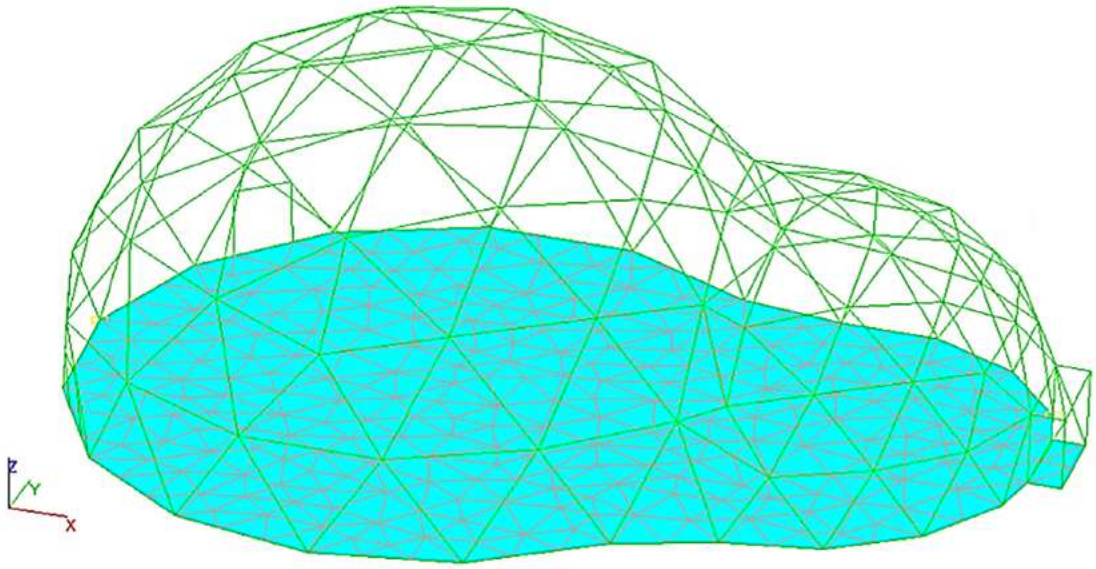



Рис. 9. Пространственная конечно-элементная модель

На втором этапе выполнялись прочностные расчеты выбранной купольной конструкции выставочного комплекса. Предложенная конструкция представляет собой легкую и прочную пространственно-сетчатую оболочку, состоящую из стрежней с ячейками в виде правильных треугольников — так называемый геодезический купол. Данная конструкция выполнена из двух совмещенных друг с другом металлических куполов разного диаметра (большого — 40 м и малого — 28 м). Расчет выполнялся с использованием программного комплекса SCAD, прочностной анализ рассматриваемой конструкции осуществлялся на основе метода конечных элементов с использованием пространственной расчетной модели (рис. 9).

В ходе выполнения расчетного исследования были получены следующие результаты.

Для элементов каркаса куполов подобраны круглые металлические трубы диаметром 100 мм. Получены значения перемещений и усилий, находящихся в допустимых пределах. По результатам теплотехнических расчетов все рассмотренные конструкции отвечают теплотехническим требованиям. В окончательном варианте, учитывая физико-механические свойства материала и климатические условия района строительства, в качестве заполнения прозрачной оболочки каркаса была принята мембранная система ETFE, состоящая из трех слоев (наружного, среднего и внутреннего) и имеющая множество преимуществ: малый вес, длительный срок службы, ударопрочность, пожаробезопасность, экологичность, пластичность, ремонтопригодность, высокую сопротивляемость внешним нагрузкам и другие.

Архитектурно-конструктивное решение выставочного комплекса с предложенной конструкцией солнцезащиты при грамотном учете различных параметров (географических и климатических особенностей района строительства, ориентации фасада здания и др.) может применяться в практике строительства.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

1. В современной практике проектирования и строительства разработано достаточно большое количество различных объемно-планировочных и конструктивных решений с учетом особенностей климатических параметров.

2. Повышение среднегодовых температур на планете, рост стоимости топливно-энергетических ресурсов, усиление политики энергосбережения — все это свидетельствует о необходимости внимательного и комплексного подхода к выбору применяемых материалов конструкции и конструктивных решений ограждающих конструкций в целом (стен и покрытий).

3. Существенное влияние на функционально-пространственную организацию и архитектурный облик зданий и сооружений различного назначения, а также на создание максимально комфортных условий жизнедеятельности человека оказывают климатические особенности региона строительства.

4. Использование методов солнцезащиты должно обеспечивать снижение негативного воздействия инсоляции при ее достаточно длительной продолжительности, что выражается в перегреве помещений, в появлении эффекта слепящей блесткости, образующегося в результате отражения прямых солнечных лучей от гладких поверхностей, приводящих к зрительному утомлению.

5. В условиях жаркого климата при проектировании зданий и сооружений, в частности общественных комплексов, рекомендуется применять архитектурно-планировочные и конструктивные решения, а также материалы, позволяющие создавать комфортную, безопасную, эстетическую, доступную и технологическую среду.

6. Выполненное исследование показало, что среди всего многообразия конструктивных решений одним из универсальных решений является использование в качестве ограждающих конструкций купольных конструкций, позволяющих проектировать и возводить уникальные с точки зрения архитектуры сооружения в различных природно-климатических условиях. Это подтверждается и внедрением в строительство концепции трансформирования, согласно которой возводимые объекты смогут менять свой архитектурный облик в зависимости от окружающей среды. Применение современных инновационных материалов покрытия, в частности пленки ETFE, имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными материалами: она вдвое дешевле и намного легче архитектурного стекла, трансмиссионные свойства данной системы позволяют исключить дополнительные источники света в интерьере и другие.

Проведенные исследования также позволяют говорить о целесообразности проведения дальнейших исследований для оценки возможности и эффективности применения мембранных систем в практике проектирования объектов различного назначения, возводимых в различных природно-климатических районах.

## Библиографический список

1. Triana M. A. Building Design for Hot and Humid Climate in a Changing World / M. A. Triana, R. De Vecchi, R. Lamberts // Building in Hot and Humid Regions. — 2019. — Pp. 59–73. — DOI: 10.1007/978-981-13-7519-4_3.

2. МГЭИК. Глобальное потепление на 1,5 °C. Резюме для политиков (на русском) / Специальный доклад МГЭИК о последствиях глобального потепления на 1,5 °C выше доиндустриальных уровней и о соответствующих траекториях глобальных выбросов парниковых газов в контек-

сте усиления глобального реагирования на угрозу изменения климата, устойчивого развития и усилий по искоренению нищеты (СД15) / МГЭИК, 2019. — 32 с. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_ru.pdf.

3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. — М.: Росгидромет, 2022. — 104 с.

4. Аронин Дж. Э. Климат и архитектура / Дж. Э. Аронин; пер. с англ. В. Б. Соколова. — М.: Госстройиздат, 1959. — 251 с.

5. Филлипович И. Н. Обзор практики проектирования и строительства в условиях жарко-влажного климата / И. Н. Филлипович. — М.: Стройиздат, 1973. — 267 с.

6. Саини Б. С. Строительство и окружающая среда. Исследование проблем строительства в районах с сухим жарким климатом / Б. С. Саини; пер. с англ. М. П. Таут. — М.: Стройиздат, 1980. — 174 с.

7. Оболенский Н. В. Архитектура и солнце / Н. В. Оболенский. — М.: Стройиздат, 1988. — 207 с.

8. Омар Б. Н. Технология и организация строительства объектов в жарком климате / Б. Н. Омар, М. В. Молодцов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 17. — № 4. — С. 67–73. — DOI: 10.14529/build170410.

9. Максимова М. В. Конструктивные особенности проектирования зданий в условиях жаркого климата / М. В. Максимова, О. Г. Немцева // Вестник СибАДИ. — 2017. — № 4–5(56–57). — С. 126–134. — DOI: 10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-126-134.

10. Бродач М. М. Оптимальный учет энергетического воздействия наружного климата на здание / М. М. Бродач // АВОК. — 2013. — № 4.

11. Харкнесс Е. Л. Регулирование солнечной радиации в зданиях / Е. Л. Харкнесс, М. Мехта; пер. с англ. Г. М. Айрапетовой. — М.: Стройиздат, 1984. — 177 с.

12. Ерохина Е. Д. Влияние жаркого сухого климата на типологию жилища / Е. Д. Ерохина, Е. Г. Третьякова // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020.— С. 172–176.

13. Ширкунова Е. А. Особенности традиционного жилища Монголии в условиях жаркого климата / Е. А. Ширкунова, К. М. Греневич, Е. Г. Третьякова и др.; под ред. Т. Ю. Овсянниковой, И. Р. Салагор // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: материалы XIII Международной научно-практической конференции, 28 февраля — 2 марта 2023 г.: в 2 ч. — Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2023. — 772 с. — Ч. 1. — С. 275–281.

14. Стецкий С. В. Эффективные солнцезащитные устройства в гражданском строительстве регионов с жарким солнечным климатом / С. В. Стецкий, В. А. Ходейр // Вестник МГСУ. — 2012. — № 7. — С. 9–15.

15. Спиридонов А. В. Солнезащитные устройства: европейская и российская практика нормирования / А. В. Спиридонов, И. Л. Шубин, В. И. Римшин и др. // АВОК. — 2014. — № 5. — С. 64–68. — URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5890 (дата обращения: 28.04.20321).

16. Белаш Т. А. Обеспечение комфортных условий эксплуатации транспортных объектов в условиях жаркого климата / Т. А. Белаш, Ж. В. Иванова, В. В. Найденова // Промышленное и гражданское строительство. — 2020. — № 2. — С. 23–28. — DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.23-28.

17. Богданова Г. А. Влияние жаркого климата на архитектурные и инженерные решения фасадов зданий / Г. А. Богданова, В. В. Найденова // Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга: сб. материалов внутрифакультетской научной конференции, посвященные 210-летию Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I и 155-летию кафедры «Здания» (Санкт-Петербург, 17 апреля 2019 года) / Под общ. ред. проф., д. т. н. Т. А. Белаш, ст. преп. А. В. Кузнецова. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. — С. 142–146.

18. Belash T. A. Additional measures protecting buildings from climatic influences / T. A. Belash, T. V. Ivanova, D. A. Ivashintsov // Magazine of Civil Engineering. — 2022. — Iss. 116(8). — Article no. 11614. — DOI: 10.34910/MCE.116.14.

19. Barozzi M. The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture / M. Barozzi, J. Lienhard, A. Zanelli // Procedia Engineering. — 2016. —

Iss. 155. — Pp. 275–284. — DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.029.

20. Robert L. A Shade of Distinction / L. Robert. — URL: https://www.civilengineering-digital.com/civilengineering/december_2013/MobilePagedArticle.action?articleId=367902#articleId367902 (дата обращения: 28.04.2023).

21. Boake T. M. Hot climate double façades: Avoiding Solar Gain / T. M. Boake. — URL: https://www.tboake.com/bio/facadetectonics2014boake-rev.pdf.

22. Fortmeier R. Kinetic Architecture: Designs for Active Envelopes / R. Fortmeier, Ch. Lin. — URL: https://www.archdai-ly.com/537359/kinetic-architecture-designs-for-active-envelopes (дата обращения: 28.04.2023).

23. Tao Yu. Applied Research of ETFE Membrane Gas Pillow Structure in Modern Stadiums / Yu Tao, Zhu Yanhui // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. — Iss. 5(13). — Pp. 3654–3660. — DOI: 10.19026/rjaset.5.4504.

24. Концепция развития выставочно-ярморочной и конгрессной деятельности в Российской Федерации // Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1273-р. — 2014.

25. Lamnatou Chr. Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings / Chr. Lamnatou, A. Moreno, D. Chemisana et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2018. — Vol. 82. — Pp. 2186–2201. — DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.072.

Дата поступления: 10.05.2023
Решение о публикации: 31.05.2023

**Контактная информация:**
ИВАНОВА Жанна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; syrmava@mail.ru
БОГДАНОВА Галина Алексеевна — канд. техн. наук, доц.; galina_zdanya@mail.ru

## Creating Comfortable Conditions for the Operation of Exhibition Complexes in Hot Climates

**Zh. V. Ivanova, G. A. Bogdanova**

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

**For citation:** Ivanova Zh. V., Bogdanova G. A. Creating comfortable conditions for the operation of exhibition complexes in hot climates // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 336–347. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-336-347

### Summary
**Purpose:** To consider the possibility of using modern innovative coating materials, and in particular ETFE film, in the enclosure structures when designing public buildings in different natural and climatic conditions, with the example of regions with hot climates. **Method:** Generalization of design principles, including those for hot climates. Analysis of climatic parameters of hot climate regions which have a significant impact on comfortable conditions of people staying in public buildings, characterized by multifunctionality, large spatial dimensions, high occupancy rates, and other factor s. To show the possibility of providing favorable conditions for people staying in such buildings in different ways: through planning and design; improvement of adjacent areas; the location of the building. To carry out the analysis of domestic and foreign experience of application of means of sun protection of buildings. To develop space-planning and structural solutions of the exhibition complex. To evaluate the effectiveness of the proposed solution through a computational study. **Results:** The results of the research of a range of measures aimed at improving the conditions for comfortable stay of people in the exhibition complexes are presented. The constructive solution of sun protection of the exhibition complex taking into account physical

and mechanical properties of the membrane system and climatic conditions of the construction areas has been proposed. **Practical significance:** The versatility of using dome structures as enclosures is demonstrated. The advantage of using innovative covering materials as an alternative to traditional materials is shown.

**Keywords:** Hot climate, exhibition complex, microclimate, sun protection, dome structures, membrane system.

## References

1. Triana M. A., De Vecchi R., Lamberts R. Building Design for Hot and Humid Climate in a Changing World. Building in Hot and Humid Regions, 2019, pp. 59–73. DOI: 10.1007/978-981-13-7519-4_3.

2. *MGEIK. Globalnoye potepleniye na 1,5 °C. Rezyume dlya politikov (na russkom) / Spetsialniy doklad MGEIK o posledstviyakh globalnogo potepleniya na 1,5 °C vyshe doindustrialnykh urovney i o sootvetstvuyuschikh trayektoriyakh globalnykh vybrosov parnikovykh gazov v kontekste usileniya globalnogo reagirovaniya na ugrozu izmeneniya klimata, ustoychivogo razvitiya i usiliy po iskoreneniyu nischety (SD15)* [IPCC. Global Warming at 1.5 °C. Summary for Policymakers (in Russian) / IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related trajectories of global greenhouse gas emissions in the context of strengthening the global response to climate change threat, sustainable development and poverty eradication efforts (SR15)]. IPCC, 2019, 32 p. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_ru.pdf. (In Russian)

3. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2021 god* [Report on the peculiarities of the climate on the territory of Russian Federation for 2021]. Moscow: Roshydromet Publ., 2022, 104 p. (In Russian)

4. Aronin J. E. *Klimat i arkhitektura* [Climate and architecture]; translated from English by V. B. Sokolov. Moscow: Gosstrojizdat Publ., 1959, 251 p. (In Russian).

5. Phillipovich I. N. *Obzor praktiki proyektirovaniya i stroitelstva v usloviyakh zharko-vlazhnogo klimata* [Review of design and construction practices in a hot-humid climate]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1973, 267 p. (In Russian)

6. Saini B. S. *Stroitelstvo i okruzhayuschaya sreda. Issledovaniye problem stroitelstva v rayonakh s sukhim zharkim klimatom. Issledovanie problem stroitel'stva v rayonakh s sukhim zharkim klimatom* [Construction and the Environment. Study of the problems of construction in areas with dry hot climate]; translated from English by M. P. Taut. Moscow: Stroyizdat Publ., 1980, 174 p. (In Russian)

7. Obolensky N. V. *Arkhitektura i solntse* [Architecture and the Sun]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1988, 207 p. (In Russian)

8. Omar B. N., Molodtsov M. V. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitelstva obyektov v zharkom klimate* [Technology and organization of construction of objects in a hot climate]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of SUSU. Series: Construction and Architecture]. 2017, vol. 17, Iss. 4, pp. 67–73. DOI: 10.14529/build170410. (In Russian)

9. Maximova M. V., Nemtseva O. G. Konstruktivnyye osobennosti proyektirovaniya zdaniy v usloviyakh zharkogo klimata [Structural features of building design in a hot climate]. *Vestnik SibADI* [Bulletin of the SibADI]. 2017, Iss. 4–5(56–57), pp. 126–134. DOI: 10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-126-134. (In Russian)

10. Brodach M. M. Optimalniy uchet energeticheskogo vozdeystviya naruzhnogo klimata na zdaniye [Optimal consideration of the energy impact of the outdoor climate on the building]. *AVOK* [AVOK]. 2013, Iss. 4. (In Russian)

11. Harkness E. L., Mehta M. *Regulirovaniye solnechnoy radiatsii v zdaniyakh* [Regulation of solar radiation in buildings]; translated from English by G. M. Ayrapetova. Moscow: Stroyizdat Publ., 1984, 177 p. (In Russian)

12. Erohina E. D., Tretiakova E. G. *Vliyanie zharkogo sukhogo klimata na tipologiyu zhilishcha. Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Influence of hot dry climate on housing typology. Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of LXXX All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2020, pp. 172–176. (In Russian)

13. Shirkunova E. A., Grenievich K. M., Tretiakova E. G. et al. *Osobennosti traditsionnogo zhilishcha Mongolii v usloviyakh zharkogo klimata. Investitsii, gradostroitel'stvo, nedvizhimost' kak drayvery sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya kachestva zhizni naseleniya: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy*

*konferentsii, 28 fevralya — 2 marta 2023 g.: v 2 ch.* [Features of traditional housing in Mongolia in a hot climate. Investments, Urban Planning, Real Estate as drivers for socio-economic development of the territory and improvement of quality of life: proceedings of the XIII-th International Scientific-Practical Conference, February 28 — March 2, 2023. In two parts; ed. by T. Yu. Ovsyannikova, I. R. Salagor]. Tomsk: Publishing House Vol. state architect.-builds. un-ta, 2023, 772 p., part 1, pp. 275–281. (In Russian)

14. Stetsky S. V., Khodeir V. A. *Effektivnyye solntsezaschitnyye ustroystva v grazhdanskom stroitelstve regionov s zharkim solnechnym klimatom* [Effective sun protection devices in civil engineering of regions with hot sunny climate]. Vestnik MGSU [Bulletin of MSCU]. 2012, Iss. 7, pp. 9–15. (In Russian)

15. Spiridonov A. V., Shubin I. L., Rimshin V. I. et al. Solnezaschitnyye ustroystva: yevropeyskaya i rossiyskaya praktika normirovaniya [Solar protection devices: European and Russian standardization practice]. *AVOK* [AVOK]. 2014, Iss. 5, pp. 64–68. Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5890 (accessed: April 28, 2023). (In Russian)

16. Belash T. A., Ivanova Zh. V., Najdenova V. V. Obespechenie komfortnyh uslovij jekspluatacii transportnyh ob'ektov v uslovijah zharkogo klimata [Ensuring comfortable operating conditions for transport facilities in hot climates]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2020, Iss. 2, pp. 23–28. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.02.23-28. (In Russian)

17. Bogdanova G. A., Naidenova V. V. *Vliyanie zharkogo klimata na arkhitekturnye i inzhenernye resheniya fasadov zdaniy. Problemy i dostizheniya v oblasti stroitel'nogo inzhiniringa: sb. materialov vnutrifakul'tetskoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennye 210-letiyu Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I i 155-letiyu kafedry "Zdaniya" (Sankt-Peterburg, 17 aprelya 2019 goda); pod obshch. red. prof., d. t. n. T. A. Belash, st. prep. A. V. Kuznetsova* [Influence of hot climate on architectural and engineering solutions of building facades. Problems and achievements in the field of construction engineering: collection of articles: materials of the intra-faculty scientific conference dedicated to the 210th anniversary of the St. Petersburg State University of Communications Emperor Alexander I and the 155th anniversary of the department "Buildings" (St. Petersburg, April 17, 2019). Ed. ed. prof., d. t. s. T. A. Belash, Art. teacher A. V. Kuznetsova]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2019, pp. 142–146. (In Russian)

18. Belash T. A., Ivanova T. V., Ivashintsov D. A. Additional measures protecting buildings from climatic influences. Magazine of Civil Engineering. 2022, Iss. 116(8). Article no. 11614. DOI: 10.34910/MCE.116.14.

19. Barozzi M., Lienhard J., Zanelli A. The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture. Procedia Engineering, 2016, Iss. 155, pp. 275–284. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.029.

20. Robert L. A Shade of Distinction. Available at: https://www.civilengineering-digital.com/civilengineering/december_2013/MobilePagedArticle.action?articleId=367902#articleId367902 (accessed: April 28, 2023).

21. Boake T. M. Hot climate double façades: Avoiding Solar Gain. Available at: https://www.tboake.com/bio/facadetectonics2014boake-rev.pdf.

22. Fortmeier R., Lin Ch. Kinetic Architecture: Designs for Active Envelopes. Available at: https://www.archdai-ly.com/537359/kinetic-architecture-designs-for-active-envelopes (accessed: April 28, 2023).

23. Tao Yu., Yanhui Zhu Applied Research of ETFE Membrane Gas Pillow Structure in Modern Stadiums. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Iss. 5(13), pp. 3654–3660. DOI: 10.19026/rjaset.5.4504.

24. *Kontseptsiya razvitiya vystavochno-yarmorochnoy i kongressnoy deyatelnosti v Rossiyskoy Federatsii* [The concept of the development of exhibition and exhibition and congress activities in the Russian Federation]. Government Decree of the Russian Federation № 1273-r, 2014. (In Russian)

25. Lamnatou Chr., Moreno A., Chemisana D. et al. Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, vol. 82, pp. 2186–2201. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.072.

Received: May 10, 2023
Accepted: May 31, 2023

**Author's information:**
Zhanna V. IVANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; syrmava@mail.ru
Galina A. BOGDANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; galina_zdanya@mail.ru

УДК 628.2

# Зависимость гидравлических характеристик самотечных канализационных трубопроводов от способа проведения их бестраншейного ремонта

**В. М. Петров, Л. Д. Терехов**

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

**Для цитирования:** *Петров В. М., Терехов Л. Д.* Зависимость гидравлических характеристик самотечных канализационных трубопроводов от способа проведения их бестраншейного ремонта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 348–356. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-348-356

## Аннотация

**Цель:** При реконструкции самотечных канализационных сетей, проложенных в условиях городской среды и сельской местности, могут быть использованы различные технологии. Бестраншейный ремонт, активно используемый на застроенной территории, впоследствии влияет на пропускную способность сетей, при этом гидравлические характеристики потока зависят от принятой технологии производства работ. Оценка гидравлических характеристик самотечных канализационных трубопроводов в зависимости от выбираемого способа проведения их бестраншейного ремонта является целью проведения исследования. **Методы:** Определение аналитическим путем гидравлических характеристик потока в самотечных трубопроводах после их ремонта различными бестраншейными способами и сравнение полученных результатов. **Результаты:** Анализ полученных результатов показывает, что после реконструкции различными способами гидравлические параметры работы трубопроводов могут измениться и не соответствовать нормативным требованиям. Показана необходимость проведения аналитических расчетов на этапе выбора способа проведения бестраншейного ремонта самотечных канализационных сетей. **Практическая значимость:** Результаты работы рекомендуется учитывать при выборе бестраншейных технологий ремонта самотечных канализационных трубопроводов.

**Ключевые слова:** Эксплуатация, канализационные самотечные трубопроводы, реконструкция, бестраншейный ремонт, гидравлические характеристики.

## Введение

На территории Российской Федерации, согласно статистическим данным [1], протяженность самотечных сетей канализации составляет более 80 тыс. км. При этом протяженность таких трубопроводов, проложенных по городской территории, составляет более 60 тыс. км, а в сельской местности — около 20 тыс. км.

Большая часть канализационных сетей, которые сейчас находятся в эксплуатации, были построены в 1950–1970-х годах в период массового домостроения. В наше время большая их часть нуждается в замене [2–4]. Так, согласно [1], на территории Российской Федерации протяженность сетей канализации, нуждающихся в реконструкции, составляет около 40 тыс. км, из которых более 30 тыс.

км относятся к городской территории и 10 тыс. км — к сельской местности. Например, число аварий на сетях канализации на территории Российской Федерации составляет около 17 тысяч, из которых около 15 тысяч приходится на зону городской застройки [1].

Данная статистика говорит о том, что большая часть сетей, нуждающихся в ремонте, проходит по территории городской застройки. Современные городские условия не всегда позволяют выполнить ремонт канализационных сетей открытым способом с рытьем траншей. При таком способе производства работ для ремонта и замены трубопровода требуется останавливать транспортное движение на данном участке, при этом может возникнуть необходимость вывода из эксплуатации иных коммуникаций, проходящих в непосредственной близости с ремонтным участком.

Поэтому наиболее рациональным способом реконструкции канализационной сети в черте городов считается использование бестраншейных технологий ремонта [5–9]. Для этого возможно использовать три основных способа реконструкции канализационных сетей [8]: «Релайнинг», Swagelining и протягивание полимерного рукава (чулка) в трубу с последующей термообработкой.

Способ ремонта «Релайнинг» может проводиться с разрушением существующего трубопровода [8]. Он позволяет прокладывать новый трубопровод внутри существующего с помощью пневмопробойника. При этом существующий трубопровод подвергается разрушению, а на его место протягивается новый трубопровод. Данный метод позволяет сохранить необходимые гидравлические характеристики канализационной сети. При необходимости на некоторых участках возможно даже увеличение диаметра.

Способ Swagelining заключается в протягивании в существующую трубу новой полимерной трубы, предварительно прошедшей для уменьшения ее диаметра специальную матрицу. После установки новой трубы в проектное положение новая труба расширяется, пока ее внешний диаметр не будет соответствовать внутреннему диаметру прежнего трубопровода. Этот способ ведет к уменьшению сечения ремонтируемого трубопровода на 10–15 % [8].

Метод протягивания полимерного рукава (чулка) в трубу с последующей термообработкой состоит в укреплении внутренних стенок существующего трубопровода за счет протягивания в него полимерного рукава. После чего в полимерный рукав подается сжатый воздух для плотного прилегания к стенкам ремонтируемого трубопровода. Бестраншейный ремонт данным методом дает возможность продолжить эксплуатировать трубопровод до 50 лет. Метод протягивания полимерного рукава [8] ведет к уменьшению сечения ремонтируемого трубопровода на 5–7 %.

В связи с возможным изменением параметров внутреннего сечения трубопровода после проведения ремонтных работ изменяются и гидравлические характеристики работы трубопроводов [10].

Актуальность данного исследования заключается в том, что существует потребность в оценке изменения гидравлических характеристик самотечных трубопроводов после проведения их бестраншейного ремонта.

Целью исследования является оценка гидравлических характеристик самотечных канализационных трубопроводов в зависимости от выбираемого способа проведения их бестраншейного ремонта. При проведении исследования решались следующие задачи:

– выявить основные гидравлические характеристики потока жидкости, которые могут изменяться после проведения бестраншейного ремонта трубопровода;

– провести аналитические расчеты гидравлических характеристик потока для самотечных трубопроводов при применении технологий бес-

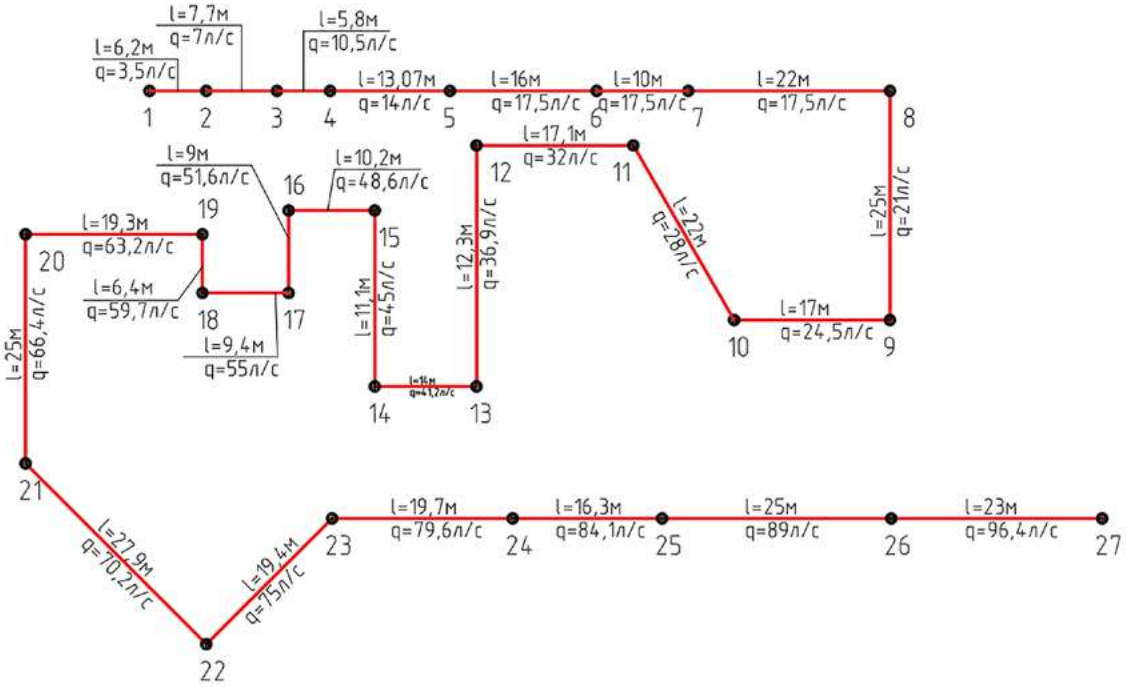



Рис. 1. Схема канализационной сети

траншейного ремонта: «Релайнинг», Swagelining и протягивание полимерного рукава (чулка);

– провести анализ полученных результатов и дать рекомендации по выбору технологии бестраншейного ремонта.

## Методы и материалы

Предметом исследования являются гидравлические характеристики потока жидкости в самотечных трубопроводах систем канализации после их реконструкции. Для решения поставленных задач и достижения конечной цели работы применялись теоретический, общефилософский анализ и синтез, наблюдение и моделирование.

В работе проводилась оценка гидравлических характеристик самотечных канализационных трубопроводов при движении в них сточных вод после проведения бестраншейного ремонта сети способами «Релайнинг», Swagelining и с помощью метода протягивания полимерного рукава (чулка).

Моделирование процессов проводилось для самотечной канализационной сети, схема которой представлена на рис. 1.

## Результаты исследования

Основными гидравлическими характеристиками потока жидкости, которые могут изменяться после бестраншейного ремонта трубопровода, являются: средняя скорость потока $V$, наполнение трубопровода $\underline{h/d}$, площадь живого сечения потока ω, гидравлический радиус $R$, коэффициент шероховатости стенок трубы $n$.

Основные расчеты гидравлических характеристик потока были выполнены согласно методике акад. Н. Н. Павловского [11].

Средняя скорость потока $V$ определяется по формуле:

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot i}\,, \qquad (1)$$

где $R$ — гидравлический радиус, м;

$i$ — геометрический уклон дна трубопровода;

$C$ — коэффициент Шези, зависящий от гидравлического радиуса и шероховатости смоченной поверхности канала или трубопровода; определяется по формуле:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{y}, \quad (2)$$

где $y$ — показатель степени:

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}\,(0,1);$$

$n$ — коэффициент шероховатости; принимается по справочным данным [11, 12].

Гидравлический радиус $R$, м, определяется по формуле:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (3)$$

где $\omega$ — площадь живого сечения, м$^2$, определяемая по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\beta}{180°} - \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\sin^2 \beta}{2} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{\beta}{180°} - \frac{\sin^2 \beta}{2}\right) d^2. \quad (4)$$

$\chi$ — смоченный периметр, м, определяемый по формуле:

$$\chi = \pi d \frac{\beta}{180°}, \quad (5)$$

где $d$ — внутренний диаметр трубопровода, м;

$\beta$ — угол, характеризующий смоченную часть трубопровода [11], град.

Используя упомянутые выше зависимости и зная расчетный расход, диаметр и уклон трубопровода на каждом участке, произведен гидравлический расчет канализационной сети, представленной на рис. 1. Результаты расчетов сведены в таблицу.

Основными гидравлическими характеристиками, которые нормируются согласно [13], являются скорость потока $V$, наполнение трубопровода $h/d$. При этом в зависимости от диаметра трубопровода величина $V$ должна находиться в диапазоне между минимальным и максимальным значениями, а наполнение не должно превышать максимальных значений $h/d$. Поэтому в таблице при заданном диаметре и уклоне участков сети приведены эти два параметра.

Аналогичные расчеты выполнены по определению гидравлических характеристик трубопроводов после их бестраншейного ремонта перечисленными ранее способами. Результаты расчета по участкам рассматриваемой сети представлены в виде графиков на рис. 2 и 3.

На графиках приведено изменение скорости движения потока воды $V$ (рис. 2) и наполнения $h/d$ (рис. 3) в канализационных трубопроводах при сохранении расхода $q$ и уклона трубопровода $i$ для рассматриваемых способов бестраншейного ремонта.

На рис. 2 и 3 видно, что гидравлические характеристики трубопроводов при пропуске требуемых расходов сточных вод после реконструкции изменяются в зависимости от выбранного способа их бестраншейного ремонта и могут не соответствовать нормативным требованиям, предъявляемым к работе самотечных канализационных трубопроводов [13]:

– после проведения бестраншейного ремонта методом Swagelining наблюдается увеличение скорости потока $V$ на 60–100 %, а возрастание степени наполнения трубопровода — на 14–16 %;

– для метода протягивания полимерного рукава (чулка) в трубу с последующей термообработкой скорость возрастает на 82–86 %, а наполнение трубопровода — на 4–7 %;

– в некоторых случаях после ремонта бестраншейным методом Swagelining и протягивания полимерного рукава (чулка) гидравлические характеристики превышают допустимые значения согласно [13]. Например, наполнение на некоторых участках после ремонта приближается к 1, что недопустимо для самотечной канализационной сети;

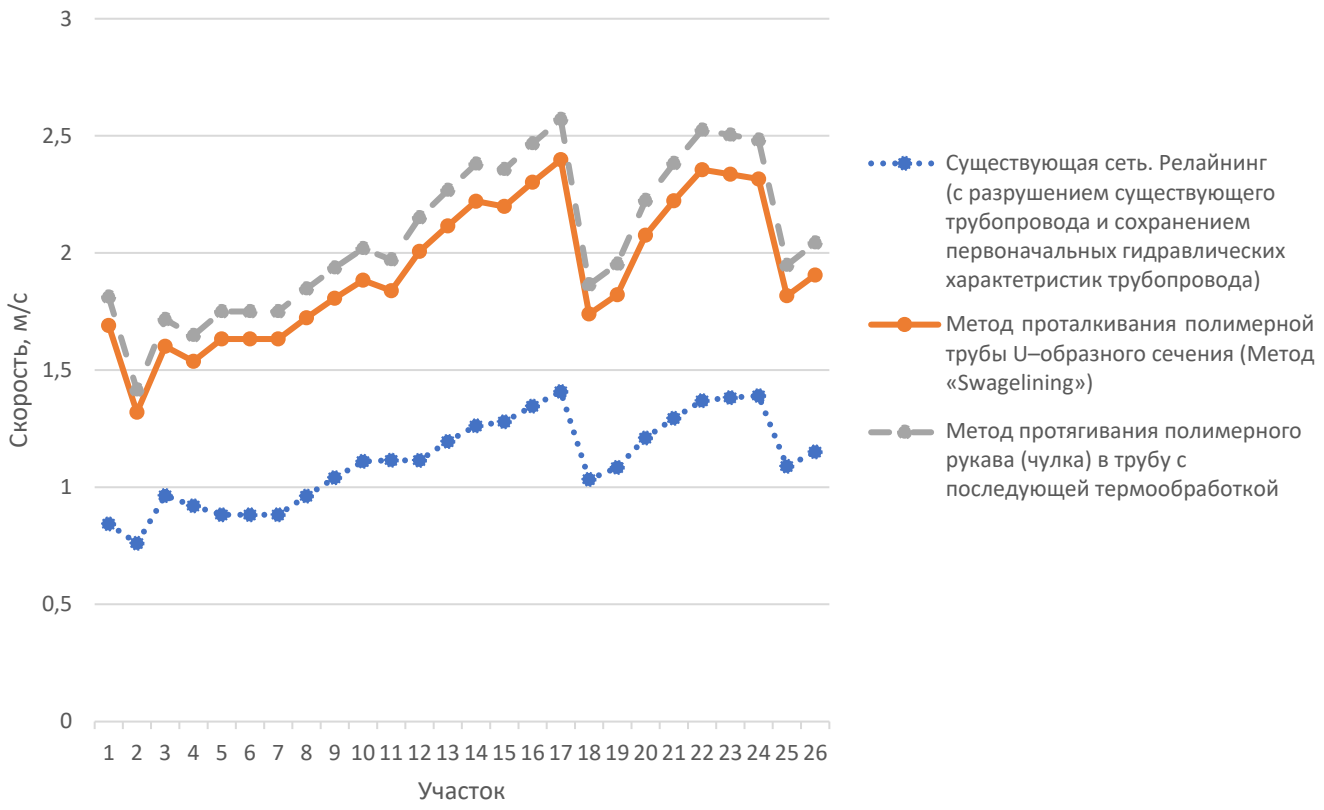



Рис. 2. Изменение скорости движения воды до и после бестраншейного ремонта

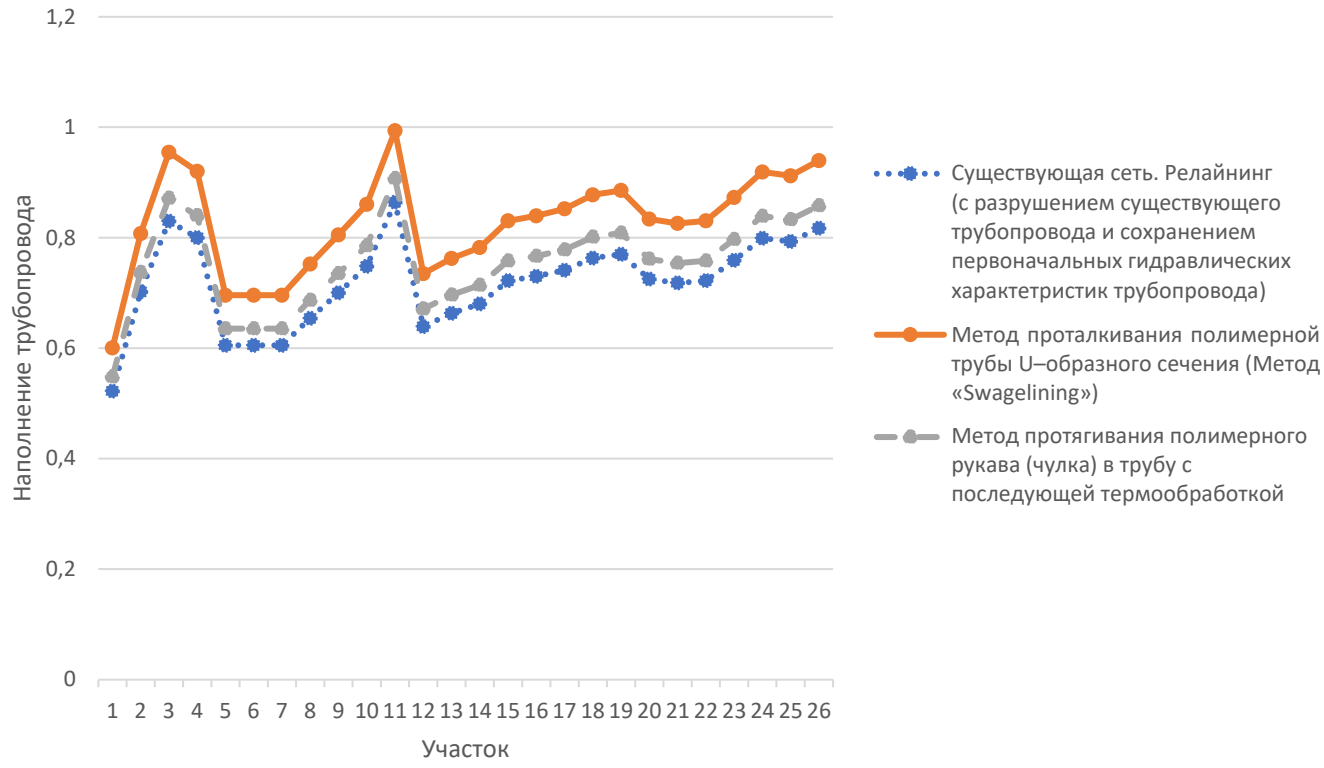



Рис. 3. Изменение наполнения трубопровода до и после бестраншейного ремонта

Гидравлические параметры канализационной сети

| № п/п | Номер участка | Длина трубы *L*, м | Расчетный расход *q*, л/с | Диаметр трубы *d*, мм | Уклон *i* | Скорость движения потока воды *V*, м/с | Наполнение трубопровода *h/d* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1-2 | 6,2 | 3,5 | 100 | 0,018 | 0,843 | 0,522 |
| 2 | 2-3 | 7,7 | 7 | 125 | 0,009 | 0,76 | 0,702 |
| 3 | 3-4 | 5,8 | 10,5 | 125 | 0,014 | 0,964 | 0,83 |
| 4 | 4-5 | 13,07 | 14 | 150 | 0,01 | 0,92 | 0,8 |
| 5 | 5-6 | 16 | 17,5 | 200 | 0,007 | 0,882 | 0,605 |
| 6 | 6-7 | 10 | 17,5 | 200 | 0,007 | 0,882 | 0,605 |
| 7 | 7-8 | 22 | 17,5 | 200 | 0,007 | 0,882 | 0,605 |
| 8 | 8-9 | 25 | 21 | 200 | 0,008 | 0,962 | 0,654 |
| 9 | 9-10 | 17 | 24,5 | 200 | 0,009 | 1,04 | 0,7 |
| 10 | 10-11 | 22 | 28 | 200 | 0,01 | 1,11 | 0,748 |
| 11 | 11-12 | 17,1 | 32 | 200 | 0,01 | 1,115 | 0,864 |
| 12 | 12-13 | 12,3 | 36,9 | 250 | 0,008 | 1,114 | 0,639 |
| 13 | 13-14 | 14 | 41,2 | 250 | 0,009 | 1,195 | 0,663 |
| 14 | 14-15 | 11,1 | 45 | 250 | 0,01 | 1,262 | 0,68 |
| 15 | 15-16 | 10,2 | 48,6 | 250 | 0,01 | 1,279 | 0,722 |
| 16 | 16-17 | 9 | 51,6 | 250 | 0,011 | 1,346 | 0,73 |
| 17 | 17-18 | 9,4 | 55 | 250 | 0,012 | 1,408 | 0,741 |
| 18 | 18-19 | 6,4 | 59,7 | 300 | 0,005 | 1,033 | 0,763 |
| 19 | 19-20 | 19,3 | 63,2 | 300 | 0,0055 | 1,084 | 0,77 |
| 20 | 20-21 | 25 | 66,4 | 300 | 0,007 | 1,21 | 0,725 |
| 21 | 21-22 | 27,9 | 70,2 | 300 | 0,008 | 1,294 | 0,718 |
| 22 | 22-23 | 19,4 | 75 | 300 | 0,009 | 1,369 | 0,722 |
| 23 | 23-24 | 19,7 | 79,6 | 300 | 0,009 | 1,382 | 0,759 |
| 24 | 24-25 | 16,3 | 84,1 | 300 | 0,009 | 1,39 | 0,799 |
| 25 | 25-26 | 25 | 89 | 350 | 0,0045 | 1,089 | 0,793 |
| 26 | 26-27 | 23 | 96,4 | 350 | 0,005 | 1,15 | 0,817 |

– метод бестраншейного ремонта «Релайнинг» является наиболее рациональным с гидравлической точки зрения, так как он позволяет сохранять, а при необходимости улучшать гидравлические характеристики трубопровода до реконструкции, хотя требует значительных трудовых, финансовых и временных затрат.

## Заключение

Представленные результаты показывают, что основными гидравлическими характеристиками потока жидкости, которые нормируются и могут измениться после реконструкции самотечных канализационных трубопроводов, являются средняя скорость потока *V*, наполнение трубопровода *h/d*.

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что после реконструкции различными способами гидравлические параметры работы трубопроводов могут измениться и не соответствовать нормативным требованиям. Метод бестраншейного ремонта «Релайнинг» является наиболее целесообразным, так как позволяет сохранять первоначальные гидравлические характеристики трубопровода. Таким образом, на этапе выбора способа проведения бестраншейного ремонта самотечных канализационных сетей необходимо проведение аналитических расчетов по определению гидравлических характеристик трубопроводов после реконструкции с проверкой их на соответствие нормативам.

## Библиографический список

1. Российский статистический ежегодник: стат. сб. — М.: Росстат, 2022. — 691 с.

2. Примин О. Г. Надежность и экологическая безопасность водопроводных и водоотводящих трубопроводов / О. Г. Примин, Г. Н. Громов // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 4. — С. 54–61.

3. Орлов В. А. Бестраншейные технологии и энергосбережение / В. А. Орлов. — М.: АСВ, 2021. — С. 124.

4. Степанов М. А. Проблемы надежности трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения и пути их решения / М. А. Степанов, О. Г. Примин // Водоснабжение и санитарная техника. — 2021. — № 10. — С. 7–15.

5. Орлов В. А. Технологии бестраншейной реновации трубопроводов: монография / В. А. Орлов, А. В. Михайлин, Е. В. Орлов. — М.: АСВ, 2011. — 133 с.

6. Продоус О. А. Рекомендации по выбору способа и подбору технологического оборудования для бестраншейного ремонта инженерных сетей / О. А. Продоус. — СПб.: НИИ АКХ им. К. Д. Памфилова, 2004. — 51 с.

7. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий. Теория и практика / А. П. Рыбаков. — М.: ПрессБюро, 2005. — 304 с.

8. Орлов В. А. Бестраншейные технологии разрушения ветхих инженерных сетей и протаскивание в освободившееся пространство новых труб / В. А. Орлов, С. П. Зоткин, Д. А. Петербургский // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. — 2022. — № 9(249). — С. 28–33.

9. Примин О. Г. Технологии бестраншейной реконструкции водоотводящих сетей с использованием полимерных материалов / О. Г. Примин // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2022. — № 6(1054). — С. 44–46.

10. Терехов Л. Д. Об изменении потерь напора и расходов в трубопроводах после бестраншейного ремонта способом «труба в трубе» / Л. Д. Терехов, А. В. Федорчук // Яковлевские чтения: сборник докладов XII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева. — М.: МГСУ. 2017. — С. 146–156.

11. Лукиных А. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н. Н. Павловского / А. А. Лукиных, Н. А. Лукиных. — Изд. 4-е, доп. — М.: Стройиздат, 1974. — 156 с.

12. Курганов А. М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: справочник / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров; под общ. ред. А. М. Курганова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1986. — 440 с.

13. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03—85 (с Изменением № 1). — М.: Стройинформ, 2018.

Дата поступления: 05.05.2023
Решение о публикации: 30.05.2023

**Контактная информация:**
ПЕТРОВ Владимир Михайлович — аспирант кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; petrov_vm1@mail.ru
ТЕРЕХОВ Лев Дмитриевич — д-р техн. наук, проф.; levter4@rambler.ru

# Dependence of Hydraulic Characteristics of Gravity Sewer Pipelines on the Method of Trenchless Repair

**V. M. Petrov, L. D. Terehov**

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

**For citation:** Petrov V. M., Terekhov L. D. Dependence of Hydraulic Characteristics of Gravity Sewer Pipelines on the Method of Trenchless Repair // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 348–356. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-348-356

## Summary

**Purpose:** When reconstructing gravity sewer networks laid in urban and rural environments, various technologies can be used. Trenchless repairs, which are actively used in a built-up area, subsequently affect the capacity of networks, while the hydraulic characteristics of the flow depend on the accepted technology of work. Assessment of hydraulic characteristics of gravity sewer pipelines depending on the chosen method of carrying out their trenchless repair is the purpose of the study. **Methods:** Analytical determination of hydraulic flow characteristics in gravity pipelines after their repair by various trenchless methods and comparison of the results obtained. **Results:** The analysis of the obtained results shows that after reconstruction in various ways, the hydraulic parameters of the pipelines may change and not meet regulatory requirements. The necessity of carrying out analytical calculations at the stage of choosing a method for trenchless repair of gravity sewer networks is shown. **Practical significance:** The results of the work are recommended to be taken into account when choosing trenchless technologies for repairing gravity sewer pipelines.

**Keywords:** Operation, gravity sewer pipelines, reconstruction, trenchless repair, hydraulic characteristics.

## References

1. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik: stat. sb.* [Russian statistical yearbook: statistical collection]. Moscow: Rosstat Publ., 2022, 691 p. (In Russian)

2. Primin O. G., Gromov G. N. Nadezhnost' i ekologicheskaya bezopasnost' vodoprovodnykh i vodootvodyashchikh truboprovodov [Reliability and environmental safety of water and drainage pipelines]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2021, Iss. 4, pp. 54–61. (In Russian)

3. Orlov V. A. *Bestransheynye tekhnologii i energosberezhenie* [Trenchless technologies and energy saving]. Moscow: ASV Publ., 2021, p. 124. (In Russian)

4. Stepanov M. A., Primin O. G. Problemy nadezhnosti truboprovodov sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya i puti ikh resheniya [Problems of reliability of pipelines of water supply and sanitation systems and ways to solve them]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering]. 2021, Iss. 10, pp. 7–15. (In Russian)

5. Orlov V. A., Mikhaylin A. V., Orlov E. V. *Tekhnologii bestransheynoy renovatsii truboprovodov: monografiya* [Technologies of trenchless renovation of pipelines: monograph]. Moscow: ASV Publ., 2011, 133 p. (In Russian)

6. Prodous O. A. *Rekomendatsii po vyboru sposoba i podboru tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya bestransheynogo remonta inzhenernykh setey* [Recommendations on the choice of method and selection of technological equipment for trenchless repair of engineering networks]. St. Petersburg: NII AKKh im. K. D. Pamfilova, 2004, 51 p. (In Russian)

7. Rybakov A. P. *Osnovy bestransheynykh tekhnologiy. Teoriya i praktika* [Fundamentals of trenchless technologies. Theory and practice]. Moscow: PressByuro Publ., 2005, 304 p. (In Russian)

8. Orlov V. A., Zotkin S. P., Peterburgskiy D. A. Bestransheynye tekhnologii razrusheniya vetkhikh inzhenernykh setey i protaskivanie v osvobodivsheesya prostranstvo novykh trub [Trenchless technologies for the destruction of dilapidated engineering networks and pulling new pipes into

the vacated space]. *Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie* [Sanitary engineering, Heating, Air conditioning]. 2022, Iss. 9(249), pp. 28–33. (In Russian)

9. Primin O. G. Tekhnologii bestransheynoy rekonstruktsii vodootvodyashchikh setey s ispol'zovaniem polimernykh materialov [Technologies for trenchless reconstruction of drainage networks using polymeric materials]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Bulletin of construction equipment]. 2022, Iss. 6(1054), pp. 44–46. (In Russian)

10. Terekhov L. D., Fedorchuk A. V. *Ob izmenenii poter' napora i raskhodov v truboprovodakh posle bestransheynogo remonta sposobom "truba v trube". Yakovlevskie chteniya: sbornik dokladov XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati akademika RAN S. V. Yakovleva* [On the change in pressure losses and flow rates in pipelines after trenchless repair by the "pipe in pipe" method. Yakovlev readings: a collection of reports of the XII International Scientific and Technical Conference, dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S. V. Yakovlev]. Moscow: MGSU Publ., 2017, pp. 146–156. (In Russian)

11. Lukinykh A. A., Lukinykh N. A. *Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta kanalizatsionnykh setey i dyukerov po formule akad. N. N. Pavlovskogo. Izd. 4-e, dop.* [Tables for the hydraulic calculation of sewer networks and siphons according to the formula of acad. N. N. Pavlovsky. Ed. 4th, add]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1974, 156 p. (In Russian)

12. Kurganov A. M., Fedorov N. F. *Gidravlicheskie raschety sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: spravochnik. 3-e izd., pererab. i dop.* [Hydraulic calculations of water supply and sanitation systems: reference book. 3rd ed., revised. and additional]. L.: Stroyizdat. Leningr. otdelenie Publ., 1986, 440 p. (In Russian)

13. *SP 32.13330.2018. Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. SNiP 2.04.03—85 (s Izmeneniem № 1)* [SP 32.13330.2018. Sewerage. External networks and structures. SNiP 2.04.03—85 (with Amendment № 1)]. Moscow: Stroyinform Publ., 2018. (In Russian)

Received: May 05, 2023
Accepted: May 30, 2023

**Author's information:**
Vladimir M. PETROV — Postgraduate Student, Department of Water Supply, Sewage and Hydraulics; petrov_vm1@mail.ru
Lev D. TEREHOV — Dr. Sci. in Engineering Sciences, Professor; levter4@rambler.ru

УДК 628.16;628.3

# Применение дезинфектантов нового поколения в решении современных проблем обеззараживания в водопроводно-канализационном хозяйстве

**Л. Н. Парамонова, С. Г. Амеличкин, Е. А. Махонько, Л. Д. Терехов**

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

**Для цитирования:** *Парамонова Л. Н., Амеличкин С. Г., Махонько Е. А., Терехов Л. Д.* Применение дезинфектантов нового поколения в решении современных проблем обеззараживания в водопроводно-канализационном хозяйстве // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 357–364. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-357-364

## Аннотация

**Цель:** Рассмотреть и оценить альтернативные методы обеззараживания воды и дезинфекции водопроводно-канализационных сооружений и выбрать наиболее перспективный. Определить возможность применения нескольких средств одновременно, выбрать дезинфектанты, имеющие биоразлагаемый состав, применение которых позволит снизить негативное влияние на окружающую среду. **Методы:** Сравнение состава и эффективности существующих дезинфицирующих средств. **Результаты:** Указана необходимость применения различных комбинаций дезинфицирующих средств для уменьшения вероятности резистентности у микроорганизмов к биоцидам. Наиболее перспективным методом обработки сооружений является аэрозольный метод, который позволяет получить необходимый эффект обеззараживания малыми дозами реагента. Использование поликомпонентных дезинфицирующих средств (например, анолита и биоцида «Серебряная пуля), благодаря их составу это безопасно для человека и окружающей среды и позволяет избежать привыкания микроорганизмов к препаратам. **Практическая значимость:** В связи с изменяющимися в худшую сторону условиями водозабора и ужесточением нормативов по содержанию вредных веществ в питьевой воде применение комбинированных схем обеззараживания вод и дезинфекции сооружений является наиболее перспективным.

**Ключевые слова:** Обеззараживание воды, дезинфекция сооружений, дезинфектанты, способы дезинфекции.

## Введение

По данным формы федерального статистического наблюдения № 18 «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации» за первое полугодие 2021 года, доля проб питьевой воды из водопроводной сети, не соответствующих гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям, составила 12,6 %, а по микробиологическим 2 %.

Поэтому уничтожение болезнетворных микроорганизмов при дезинфекции водопроводных и канализационных сооружений является важной экологической и санитарно-эпидемиологической задачей.

С принятием новых нормативов качества воды ужесточились требования по некоторым из контролируемых микробиологических показателей, увеличилось их число. Многие традиционные методы не всегда обеспечивают выполнение этих нормативов. Кроме того, предпочтение отдается технологиям, безопасным для обслуживающего персонала и населения прилегающих территорий

и не зависящим от централизованной химической промышленности — безреагентным или позволяющим получать реагенты на месте применения.

Комплекс мер по уничтожению болезнетворных бактерий состоит из непосредственного обеззараживания воды и дезинфекции емкостных сооружений и трубопроводов. Чтобы избежать адаптации микроорганизмов к вводимым реагентам, необходимо использовать различные комбинации дезинфицирующих средств, которые благодаря своему поликомпонентному составу позволят обеспечить эффективное обеззараживание. Поиск новых комбинаций реагентов для обеззараживания водопроводно-канализационных сооружений в первую очередь направлен на получение таких дезинфектантов, которые обладали бы достаточным пролонгирующим эффектом и не оказывали бы негативного влияния на окружающую среду [1–3].

## Современные дезинфицирующие средства для обеззараживания и дезинфекции

Сегодня наибольшее распространение получили такие способы дезинфекции воды, как хлорирование, озонирование и обработка УФ-излучением. Замена жидкого хлора на гипохлорит натрия решила проблему безопасности при транспортировке, хранении, но не решила проблему устранения вирусов. Применение УФ-излучения обеспечивает только обеззараживание, но не имеет пролонгированного действия и самостоятельно не может использоваться для дезинфекции. Применение УФ-излучения в технологии водоподготовки возможно только в сочетании с другими методами, например совместное применение озона и ультрафиолета. Задача поиска иных методов дезинфекции и новых нетрадиционных дезинфектантов до сих пор является актуальной для специалистов данной области. Внедрение методов обеззараживания воды ЭХА-растворами является актуальным и перспективным. Получаемый при электрохимической активации анолит используется для обеззараживания и дезинфекции, а каталит — как моющее средство. Анолит в разных дозах уничтожает вирусную, бактериальную и грибковую инфекции (стафилококк, синегнойная и кишечная палочки, вирусы гепатита, полиомеилита, ВИЧ, аденовирусы, возбудители туберкулеза, сальмонеллеза, дерматикоза и т. д.). Средство разрешено к применению в аэрозольной форме. При добавлении к анолиту ароматических отдушек имеет хорошие дезодорирующие свойства и не фиксирует органические загрязнения. Оценки эффективности известных дезинфектантов позволяют утверждать, что анолит значительно превосходит их по своей продуктивности [4–6].

Еще одним из перспективных средств является поликомпонентное дезинфицирующее средство на основе перекиси водорода и ионов серебра. Изучение свойств серебра относится к концу XIX века. Особое внимание ученые уделяли коллоидным растворам серебра и «серебряной воде» [5]. Л. А. Кульский в своем обзоре [7] сообщает, что применение коллоидного серебра дало хорошие результаты по обезвреживанию столбнячного и дифтерийного токсинов. Положительные исследования позволили применять данный препарат в медицине, причем было замечено, что гибель бактерий зависит от концентрации водного раствора. При концентрации серебра (0,005 мг/л) болезнетворные бактерии гибнут в течение двух часов, а при высокой (1 мг/л) — через несколько минут, при этом противомикробные компоненты действуют моментально. Накоплен достаточный опыт применения коллоидного серебра как консерванта различных видов пищевых продуктов и дезинфектанта, используемого в медицинских целях. Однако есть необходимость более углубленного изучения бактерицидной активности серебра при применении в системах водопроводно-канализационного хозяйства [8–10].

ТАБЛИЦА 1. Технические показатели биоцида «Серебряная пуля»

| Виды микроорганизмов | Концентрация рабочего раствора (по $H_2O_2$), % | Время обеззараживания, мин |
|---|---|---|
| Бактерии | 0,125 | 30 |
| Вирусы | 0,25 | 30 |
| Генеральные уборки | 0,25 | 30 |
| Особо опасные (чума, холера тулеремия) | 0,25 | 30 |
| Плесень | 0,5 | 30 |
| Сибирская язва | 1 | 60 |

В последние годы ученые ищут способы активации существующих дезинфицирующих средств, а также возможность совместного применения их различных комбинаций с целью повышения эффективности обеззараживания, удешевления стоимости обработки и уменьшения негативных последствий на биосферу.

Учеными кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» ФГБОУ ВО ПГУПС и ООО «НПО «ЭХА-МАГ» (г. Санкт-Петербург) было разработано экологически чистое дезинфицирующее средство, состоящее из $H_2O_2$ и серебра (комплексные соединения) с пролонгированным бактериостатическим эффектом. Биоцид был зарегистрирован в России в 2013 году под торговой маркой «Серебряная пуля».

Дезинфицирующее средство «Серебряная пуля» — бесцветная прозрачная жидкость со слабым специфическим запахом, хорошо растворяющаяся в воде в любых соотношениях, плотность концентрированного раствора составляет 1,18 : 1,21 кг/дм$^3$ при 20 °С.

Средство «Серебряная пуля» обладает антимикробной активностью в отношении грамотрицательных и грамположительных (включая микобактерии туберкулеза) микроорганизмов, вирусов (включая аденовирусы, вирусы гриппа, парагрипп и другие возбудители острых респираторных инфекций, энтеровирусы, ротавирусы, вирус полиомиелита, вирусы энтеральных, парентеральных гепатитов, герпеса, атипичной пневмонии, птичьего гриппа, ВИЧ), грибов рода Кандида, Трихофитон и плесневых грибов, возбудителей внутрибольничных инфекций, анаэробной инфекции, а также обладает спороцидным действием. Концентрат дезинфицирующего средства «Серебряная пуля» выпускается в соответствии с требованиями ТУ 9392-003-09679163—2013 и имеет следующие характеристики: содержание $H_2O_2$ — 50 ± 2,5 %, комплексные соли серебра (в пересчете на металлическое серебро) — 1,500 ± 0,005 кг/дм$^3$ × 10$^3$, температура замерзания — минус 51 °С.

Обработка питьевых и сточных вод от патогенных микрорганизмов является важной частью получения воды, безопасной для населения. Традиционные методы обработки воды и сооружений имеют те или иные недостатки и не позволяют в полной мере получить длительный эффект обеззараживания без негативных последствий на окружающую среду [11–13].

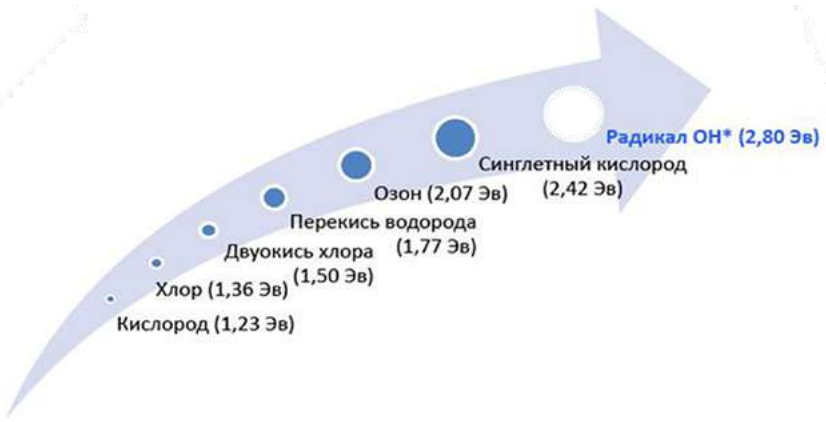
Биоцид «Серебряная пуля» обладает полной эффективностью против грамположительных и грамотрицательных бактерий, грибков, дрожжей, спор, оболочечных и безоболочечных вирусов, амеб, простейших, биопленок. Технические показатели биоцида «Серебряная пуля» представлены в табл. 1 [14].

В табл. 2 представлены сравнительные показатели дезинфицирующего средства на основе пероксида водорода с добавкой комплексных соединений серебра (на примере «Серебряная пуля») и других зарегистрированных дезинфицирующих средств [15].

Наиболее перспективным методом обработки водопроводно-канализационных сооружений является аэрозольный метод, который позволяет

ТАБЛИЦА 2. Сравнение различных видов дезифицирующих средств

| Параметр оценки | Четвертичные аммониевые соединения (ЧАС) | Хлорактивные препараты | Фенолы | Альдегиды | «Серебряная пуля» |
|---|---|---|---|---|---|
| Спектр антимикробной активности | Грамположительные бактерии, грамотрицательные бактерии (ограниченная эффективность), грибки (ограниченная эффективность), дрожжи, водоросли, оболочечные вирусы | Грамположительные бактерии, грибки, дрожжи,водоросли, оболочечные вирусы | Грамположительные бактерии, грамотрицательные бактерии, грибки, дрожжи, оболочечные вирусы | Полная эффективность от грамположительных и грамотрицательных бактерий, грибков, дрожжей, спор, оболочечных и безоболочечных вирусов | Полная эффективность от грамположительных и грамотрицательных бактерий, грибков, дрожжей, спор, оболочечных и безоболочечных вирусов, амеб, простейших, биопленок |
| Средство не эффективно по отношению к | Микобактериям,оболочечным и безоболочечным вирусам, амебам, простейшим, биопленкам | Амебам, простейшим и биопленкам | Безоболочечным вирусам, амебам, биопленкам | Амебам, простейшим, биопленкам | — |
| Канцерогенное действие | Отсутствует | Доказано | Доказано | Доказано | Отсутствует |
| Мутагенное действие | Отсутствует | Доказано | Доказано | Доказано | Отсутствует |
| Запах | Отсутствует | Интенсивный | Интенсивный | Острый | Отсутствует |
| Способность к биологическому разложению | Разлагается за неделю | Плохая, необходима нейтрализация | Разлагается за неделю, необходима нейтрализация | Необходима нейтрализация | Разлагается за 3–5 часов |




Окислительный потенциал для различных дезинфектантов

получить необходимый эффект обеззараживания малыми дозами реагента.

НПО «ЭХА-МАГ» разработана технология высокодисперсного аэрозольного распыления комплексом МАГ-СП, включающем в себя мобильный аэрозольный генератор МАГ и универсальный поликомпонентный биоцид «Серебряная пуля» [16].

Технология аэрозольного распыления ультрамалыми частицами поликомпонентного дезинфектанта «Серебряная пуля» комплексом МАГ-СП позволяет создать во внутреннем объеме сооружений высокодисперсный аэрозоль, который проникает в поры бетона, обеспечивая более полную дезинфекцию. Образующиеся при реакции дезинфицирующие вещества практически мгновенно уничтожают болезнетворные микроорганизмы. Одним из наиболее реакционноспособным является гидроксильный радикал (рисунок).

Гидроксильный радикал высокоэффективен и вступает в реакцию со многими загрязнителями, являясь первой ступенью к их инактивации. Он живет секунды, но за это время успевает проникнуть через оболочку вируса, что приводит к его гибели. Радикал мгновенно окисляет любую молекулу, находящуюся рядом. Данное свойство незаменимо при обработке поверхностей, воздуха в помещениях, где требуется стерильная чистота (операционные, перевязочные, палаты для новорожденных и т. п.).

## Заключение

Поиск альтернативных методов для обработки водопроводно-канализационных объектов продолжается.

Наиболее перспективным является применение комбинированных схем обработки. Введение нескольких реагентов позволит найти оптимальное решение для выполнения все более жестких нормативов. Использование поликомпонентных дезинфицирующих средств (например, анолита и биоцида «Серебряная пуля), благодаря их составу, позволяет избежать привыкания микроорганизмов к препаратам. Применение биоразлагаемых дезинфицирующих средств безопасно для человека и окружающей среды. А их использование в аэрозольной форме позволяет снизить дозу и объем дезинфицирующих средств.

## Библиографический список

1. Абрамов В. М. Обеззараживание воды на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства / В. М. Абрамов, Г. Л. Медриш, М. В. Птисков // Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — № 6. — С. 12–13.

2. Амвросьева Т. В. Питьевая вода — важнейший эпидемиологически значимый фактор здоровья человека / Т. В. Амвросьева // Водные проблемы. Научно-практический журнал. — 2004. — № 1. — С. 27–30.

3. Михеев Н. Н. Водные ресурсы и пути решения проблемы водоснабжения в России / Н. Н. Михеев,

А. Ф. Порядин, Г. Соер и др. // Вода: экология и технология: тез. докл. 4-го Междунар. конгр. / СИБИКО интернэшнл. — М., 2000. — С. 82–384.

4. Бахир В. М. Дезинфекция питьевой воды: проблемы и решения / В. М. Бахир // Вода и экология. Проблемы и решения. — 2003. — № 1. — С. 3–11

5. Иванов В. Г. Исследование обеззараживания воды реки Волхов электрохимически активированной водой / В. Г. Иванов, П. П. Бегунов, С. П. Бегунов // XIII Международный симпозиум. Международный год воды — 2003. Австрия. 29 марта — 5 апреля 2003 г. Тезисы докладов. — М., 2003. — С. 91–92.

6. Иванов В. Г. Обеззараживание. Альтернатива традиционным методам / В. Г. Иванов, М. М. Хямяляйнен // Вода и экология. Проблемы и решения. — 2000. — № 1. — С. 33–39.

7. Кульский Л. А. Серебряная вода / Л. А. Кульский. — Киев: Наукова думка, 1987. — С. 137.

8. Ажгиревич А. И. Неорганические бактерицидные смеси пролонгированного действия на основе меди и серебра / А. И. Ажгиревич // Проблемы региональной экологии. — 2010. — № 4. — С. 94–99.

9. Ажгиревич А. И. Серебро в технологиях химико-биоцидной обработки воды: достоинства и недостатки / А. И. Ажгиревич // Проблемы региональной экологии. — 2015. — № 5. — С. 10–18.

10. Мосин О. В. Серебро в водоподготовке и водоочистке / О. В. Мосин // СОК. — 2012. — № 7.

11. Парамонова Л. Н. Перспективы применения поликомпонентных дезинфицирующих средств при обеззараживании и дезинфекции / Л. Н. Парамонова, Е. А. Махонько // Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сб. статей МНПК (Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 года) / Под ред. Н. А. Черникова, В. Г. Иванова. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — С. 158–162.

12. Парамонова Л. Н. Обеззараживание воды поликомпонентными дезинфицирующими средствами / Л. Н. Парамонова, С. Г. Амеличкин; под ред. Н. А. Черникова, В. Г. Иванова // Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сб. статей МНПК (Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 года). — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — С. 78–80.

13. Амеличкин С. Г. Инновационный подход к обеспечению санитарно-эпидемиологической безопасности на объектах морского транспорта / С. Г. Амеличкин; под общей редакцией проф. А. В. Иванченко // Материалы IV ВНПК посвященной 50-летию ФГУП НИИ промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства (28–29 июня 2017 г. Санкт-Петербург, Россия). — СПб., 2017. — С. 11–14.

14. Инструкция № 01/2014 по применению дезинфицирующего средства «Серебряная пуля» производства ООО «НПО «ЭХА-МАГ», Россия.

15. Национальный справочно-аналитический портал о дезсредствах, зарегистрированных на территории РФ. — URL: http://dezreestr.ru/.

16. Амеличкин С. Г. Инновационные технологии объемной аэрозольной дезинфекции с применением новых экологически чистых биоцидов / С. Г. Амеличкин, А. Н. Медведев, Л. Н. Парамонова; под ред. В. Г. Иванова // Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сб. статей МНПК (Санкт-Петербург, 10 декабря 2015 года). — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — С. 55–61.

Дата поступления: 28.04.2023
Решение о публикации: 30.05.2023

**Контактная информация:**
ПАРАМОНОВА Любовь Николаевна — аспирант кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; super.pln2013@ya.ru
АМЕЛИЧКИН Станислав Григорьевич — канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лаборатории кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; eha85@yandex.ru
МАХОНЬКО Елена Алексеевна — аспирант кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; makhonko@pgups.ru
ТЕРЕХОВ Лев Дмитриевич — научный руководитель, д-р техн. наук, профессор кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; levter4@rambler.ru

# The Use of New Generation Disinfectants in Solving Modern Disinfection Problems in the Water Supply and Sewerage Sector

**L. N. Paramonova, S. G. Amelichkin, E. A. Makhonko, L. D. Terekhov**

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

**For citation:** Paramonova L. N., Makhonko E. A., Terekhov L. D. The Use of New Generation Disinfectants in Solving Modern Disinfection Problems in the Water Supply and Sewerage Sector // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 357–364. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-357-364

**Summary**

**Purpose:** To consider and evaluate alternative methods of water disinfection and disinfection of water supply and sewerage facilities and to select the most effective. To determine the possibility of using several agents at the same time, to select disinfectants with a biodegradable composition, the use of which will help reduce the negative impact on the environment. **Methods:** Comparison of the composition and effectiveness of existing disinfectants. **Results:** The necessity of using various combinations of disinfectants to reduce the likelihood of resistance in microorganisms to biocides is indicated. The most promising method for treating structures is the aerosol method, which allows achieving the necessary disinfection effect with small doses of the reagent. The use of multi-component disinfectants (such as the "Silver Bullet" anolyte and biocide) is safe for humans and the environment due to their composition, it also helps prevent microbial habituation to the substances. **Practical significance:** Due to the conditions of water intake changing for the worse and stricter regulations for the content of harmful substances in drinking water, the use of combined schemes for water disinfection and disinfection of structures has most potetial.

**Keywords:** Disinfection of water, disinfection of structures, disinfectants, disinfection methods.

## References

1. Abramov V. M., Medrish G. L., Ptiskov M. V. Obezzarazhivanie vody na predpriyatiyakh vodoprovodno-kanalizatsionnogo khozyaystva [Disinfection of water at water supply and sewerage enterprises]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary equipment]. 1999, Iss. 6, pp. 12–13. (In Russian)

2. Amvrosieva T. V. Pit'evaya voda — vazhneyshiy epidemiologicheski znachimyy faktor zdorov'ya cheloveka [Drinking water is the most important epidemiologically significant factor of human health]. *Vodnye problemy. Nauchno-prakticheskiy zhurnal* [Water problems. Scientific and practical journal]. 2004, Iss. 1, pp. 27–30. (In Russian)

3. Mikheev N. N., Ordin A. F., Gert S. et al. *Vodnye resursy i puti resheniya problemy vodosnabzheniya v Rossii. Voda: ekologiya i tekhnologiya: tez. dokl. 4-go Mezhdunar. kongr.* [Water resources and ways to solve the problem of water supply in Russia. Water: ecology and technology: abstract. report 4th Intern. congr.]. M., SIBIKO international, 2000, pp. 82–384. (In Russian)

4. Bakhir V. M. Dezinfektsiya pit'evoy vody: problemy i resheniya [Disinfection of drinking water: problems and solutions]. *Voda i ekologiya. Problemy i resheniya* [Water and ecology. Problems and solutions]. 2003, Iss. 1, pp. 3–11. (In Russian)

5. Ivanov V. G., Begunov P. P., Begunov S. P. *Issledovanie obezzarazhivaniya vody reki Volkhov elektrokhimicheski aktivirovannoy vodoy. XIII Mezhdunarodnyy simpozium. Mezhdunarodnyy god vody — 2003. Avstriya. 29 marta — 5 aprelya 2003 g. Tezisy dokladov* [Investigation of disinfection of water of the Volkhov River with electrochemically activated water. XIII International Symposium. International Year of Water — 2003. Austria. March 29 - April 5, 2003 Abstracts]. Moscow, 2003, pp. 91–92. (In Russian)

6. Ivanov V. G., Khamalyainen M. M. Obezzarazhivanie. Al'ternativa traditsionnym metodam [Disinfection. Alternative to traditional methods]. *Voda i ekologiya. Problemy i resheniya* [Water and ecology. Problems and solutions]. 2000, Iss. 1, pp. 33–39. (In Russian)

7. Kulsky L. A. *Serebryanaya voda* [Silver water]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1987, p. 137. (In Russian)

8. Azhgirevich A. I. Neorganicheskie bakteritsidnye smesi prolongirovannogo deystviya na osnove medi i serebra [Inorganic bactericidal mixtures of prolonged action based on copper and silver]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of regional ecology]. 2010, Iss. 4, pp. 94–99. (In Russian)

9. Azhgirevich A. I. Serebro v tekhnologiyakh khimiko-biotsidnoy obrabotki vody: dostoinstva i nedostatki [Silver in technologies of chemical-biocidal water treatment: advantages and disadvantages]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of regional ecology]. 2015, Iss. 5, pp. 10–18. (In Russian)

10. Mosin O. V. Serebro v vodopodgotovke i vodoochistke [Silver in water treatment and water treatment]. *SOK* [SOC]. 2012, Iss. 7. (In Russian)

11. Paramonova L. N., Makhonko E. A. *Perspektivy primeneniya polikomponentnykh dezinfitsiruyushchikh sredstv pri obezzarazhivanii i dezinfektsii. Novye dostizheniya v oblastyakh vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i okhrany vodnykh resursov: sb. statey MNPK (Sankt-Peterburg, 13–15 noyabrya 2019 goda). Pod red. N. A. Chernikova, V. G. Ivanova* [Prospects for the use of polycomponent disinfectants for disinfection and disinfection. New achievements in the fields of water supply, sanitation, hydraulics and water resources protection: Sat. articles of the MNPK (St. Petersburg, November 13–15, 2019). Ed. N. A. Chernikova, V. G. Ivanova]. St. Petersburg: FSUE IN PGUPS Publ., 2021, pp. 158–162. (In Russian)

12. Paramonova L. N., Amelichkin S. G. *Obezzarazhivanie vody polikomponentnymi dezinfitsiruyushchimi sredstvami. Novye dostizheniya v oblastyakh vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i okhrany vodnykh resursov: sb. statey MNPK (Sankt-Peterburg, 13–15 noyabrya 2019 goda)* [Water disinfection by polycomponent disinfectants; ed. N. A. Chernikova, V. G. Ivanova. New achievements in the fields of water supply, water disposal, hydraulics and water resources protection: Sat. articles of the MNPK (St. Petersburg, November 13–15, 2019)]. St. Petersburg: FSUE IN PGUPS Publ., 2021, pp. 78–80. (In Russian)

13. Amelichkin S. G. *Innovatsionnyy podkhod k obespecheniyu sanitarno-epidemiologicheskoy bezopasnosti na ob"ektakh morskogo transporta; pod obshchey redaktsiey prof. A. V. Ivanchenko. Materialy IV VNPK posvyashchennoy 50-letiyu FGUP NII promyshlennoy i morskoy meditsiny Federal'nogo mediko-biologicheskogo agentstva (28–29 iyunya 2017 g. Sankt-Peterburg, Rossiya)* [Innovative approach to ensuring sanitary and epidemiological safety at maritime transport facilities; under the general editorship of prof. A. V. Ivanchenko. Proceedings of the IV VNPK dedicated to the 50th anniversary of the Federal State Unitary Enterprise Research Institute of Industrial and Marine Medicine of the Federal Medical and Biological Agency (June 28–29, 2017 St. Petersburg, Russia)]. St. Petersburg, 2017, pp. 11–14. (In Russian)

*14. Instruktsiya № 01/2014 po primeneniyu dezinfitsiruyushchego sredstva "Serebryanaya pulya" proizvodstva OOO NPO "EKhA-MAG", Rossiya* [Instruction No. 01/2014 on the use of the disinfectant "Silver Bullet" manufactured by "NPO "EKHA-MAG", Russia]. (In Russian)

*15. Natsional'nyy spravochno-analiticheskiy portal o dezsredstvakh, zaregistrirovannykh na territorii RF* [National reference and analytical portal about the disinfectants registered in the territory of the Russian Federation]. Available at: http://dezreestr.ru/. (In Russian)

16. Amelichkin S. G., Medvedev A. N., Paramonova L. N. *Innovatsionnye tekhnologii ob"emnoy aerozol'noy dezinfektsii s primeneniem novykh ekologicheski chistykh biotsidov; pod red. V. G. Ivanova. Novye dostizheniya v oblastyakh vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i okhrany vodnykh resursov: sb. statey MNPK (Sankt-Peterburg, 10 dekabrya 2015 goda)* [Innovative technologies for volumetric aerosol disinfection using new environmentally friendly biocides; ed. V. G. Ivanova. New achievements in the fields of water supply, sanitation, hydraulics and protection of water resources: Sat. articles of the MNPK (St. Petersburg, December 10, 2015)]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, pp. 55–61. (In Russian)

Received: April 28, 2023
Accepted: May 30, 2023

**Author's information:**
Lyubov N. PARAMONOVA — Postgraduate Student, Department "Water Supply, Sewerage and Hydraulics"; super.pln2013@ya.ru
Stanislav G. AMELICHKIN — PhD in Engineering, Head of the Research Laboratory, Department "Water supply, Sewerage and Hydraulics"; eha85@yandex.ru
Elena A. MAKHONKO — Postgraduate Student, Department "Water Supply, Sewerage and Hydraulics"; makhonk@pgups.ru
Lev D. TEREKHOV — Scientific Supervisor, Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department "Water supply, sewerage and hydraulics"; levter4@rambler.ru

УДК 004.624:004.021

# Распределение мощности кодов с наименьшей избыточностью алфавитов в зависимости от количества бит и кодового расстояния

**А. А. Блюдов, Д. В. Пивоваров, Г. Ю. Пронин**

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

**Для цитирования:** *Блюдов А. А., Пивоваров Д. В., Пронин Г. Ю.* Распределение мощности кодов с наименьшей избыточностью алфавитов в зависимости от количества бит и кодового расстояния // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 365-375. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-365-375

## Аннотация

**Цель:** Исследовать зависимость максимальной мощности кодов от количества разрядов и минимального кодового расстояния; найти подход к определению оптимальных правил построения контрольного вектора разделимого кода с точки зрения обеспечения минимальной избыточности при заданной достоверности передачи сообщения. **Методы:** Для проведения экспериментальных исследований использовалось компьютерное моделирование. Для теоретических исследований применены метод аналитического обзора, теория графов, теория кодирования. **Результаты:** Теоретически и экспериментально получены некоторые частные случаи распределения максимальной мощности кодовых алфавитов с заданным расстоянием Хэмминга для различных постоянных длин, полученных с помощью ранее описанного алгоритма. Предложен и описан метод удвоения мощности произвольных двоичных кодов, а также способ получения кодов с наименьшей избыточностью мощностей $M = 2^f$, где $f$ — натуральное число, для заранее заданного минимального кодового расстояния путем рекурсивного использования предложенного в статье метода. **Практическая значимость:** Выработан алгоритм удвоения мощности кодового алфавита при сохранении требуемой достоверности передачи данных. Получена методика анализа получаемых матриц кодовых векторов с целью определения правил вычисления контрольных разрядов без использования циклических алгоритмов.

**Ключевые слова:** Помехозащитное кодирование, коды с наименьшей избыточностью, кодовый алфавит, кодовое слово, расстояние Хэмминга, разделимые коды.

## Введение

При передаче информации по двоичному каналу с симметричным распределением ошибок зачастую возникает необходимость в применении помехозащитного кодирования. В статье рассматриваются только те случаи, при которых в передаваемых сообщениях присутствует постоянное число бит. При решении задачи выбора кода, наилучшим образом удовлетворяющего задачам обнаружения и исправления ошибок, исходят из многих параметров. В их числе: количество информации, передаваемое за одно сообщение, требуемая достоверность при приеме сообщения, свойства помех в канале. Так как это далеко не весь список параметров, на основании которых делают выбор кода, а также рассматриваемая авторами статьи модель (двоичный симметричный канал, равномерное блочное кодирование) применяется не во всех случаях, воспользуемся некоторым упрощением. В качестве канала и способа кодирования будем использовать только вышеупомянутые, а требуемая достоверность

передачи и свойства помехи будут определять требуемое минимальное кодовое расстояние для любой длины кодового слова.

Теперь постановка задачи выбора кода выглядит следующим образом: требуется передать $M$ сообщений, закодированных кодом с определенным расстоянием Хэмминга. Код, удовлетворяющий этим условиям, обеспечит возможность передать любую команду из $M$, а соблюдение минимального кодового расстояния $d_{\min}$ между всеми словами исключает возможность «перепутать» команды вследствие ошибки передачи [1]. При этом естественным образом возникает задача определения способа кодирования таким образом, чтобы расстояние Хэмминга было не меньше заданного, но избыточность кода была минимальной.

В данной статье приводятся некоторые результаты ранее проведенных исследований, полученные экспериментально. На их основании сделан ряд наблюдений, подтвержденных расчетно, на основании которых, в свою очередь, был предложен и описан метод удвоения мощности кодовых алфавитов, с помощью которого можно получить коды для использования при передаче данных в системах автоматики и телемеханики. Эти коды при равных расстояниях Хэмминга не будут уступать по мощности известным классам двоичных кодов. Преимущество предлагаемых кодов по сравнению с известными циклическими кодами состоит в простоте процедур кодирования и декодирования аппаратным методом и программируемых логических интегральных схем.

## 1. Зависимость мощности кодовых алфавитов от количества разрядов и минимального кодового расстояния

При написании этой статьи авторы исходили из следующих допущений:

1. Передача информации происходит по двоичному симметричному каналу.

2. При передаче используется блочное равномерное кодирование.

3. При выборе кода определяющими параметрами являются требуемая мощность кодового алфавита и вероятность успешной передачи информации в пакете.

Количество разрядов в кодовом слове обозначим как $n$, расстояние Хэмминга между двумя кодовыми словами — $d$. Каждому значению $n$ соответствует полносвязный граф, у которого $2^n$ вершин, а вес ребер соответствует расстоянию Хэмминга. Задача поиска кода наибольшей мощности для заданных $n$ и $d$ соответствует задаче поиска остова заданного веса. Так как графы, являющиеся представлением всех двоичных кодовых слов длины $n$, являются частными случаями, то для них можно использовать алгоритм, который не учитывает такие обстоятельства, как: циклы с отрицательной суммой весов, петли с нулевыми расстояниями и т. д.

Обозначим кодовое расстояние между векторами $a_i$ и $b_j$ одинаковой длины как $d(a_i, b_j)$, где $i$ и $j$ — номера элементов в множествах $I$ и $J$ соответственно.

**Алгоритм** [2]. *Нахождение подграфа максимальной мощности с заданным кодовым расстоянием.*

1. Множество $I$ устанавливаем пустым.

2. Множество $J$ возможных кодовых слов длины $n$ пронумеруем в соответствии с десятичным значением кодовых слов.

3. Элемент с нулевым номером переносим в множество $I$.

4. Выбираем следующий элемент $b$ с номером $j + 1$.

5. Если выполняется условие $d(a_i, b_j) \geq c$, где $c$ — заранее определенное минимальное кодовое расстояние, для любого $i$, то переносим элемент $b$ в кодовое множество $I$;

6. После того как все элементы множества $J$ проверены, множество $I$ — искомый код

ТАБЛИЦА 1. Зависимость мощностей кодовых алфавитов $M$ в зависимости от $n$ и $d_{min}$

| Максимальная мощность кодовых алфавитов | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ \ $d$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 4 | 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | 8 | 4 | 2 | | | | | | | | | |
| 4 | 16 | 8 | 2 | 2 | | | | | | | | |
| 5 | 32 | 16 | 4 | 2 | 2 | | | | | | | |
| 6 | 64 | 32 | 8 | 4 | 2 | 2 | | | | | | |
| 7 | 128 | 64 | 16 | 8 | 2 | 2 | 2 | | | | | |
| 8 | 256 | 128 | 16 | 16 | 4 | 2 | 2 | 2 | | | | |
| 9 | 512 | 256 | 32 | 16 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | | | |
| 10 | 1024 | 512 | 64 | 32 | 8 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | | |
| 11 | 2048 | 1024 | 128 | 64 | 16 | 8 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| 12 | 4096 | 2048 | 256 | 128 | 16 | 16 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 13 | 8192 | 4096 | 512 | 256 | 32 | 16 | 8 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 14 | 16 384 | 8192 | 1024 | 512 | 64 | 32 | 16 | 8 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| 15 | 32 768 | 16 384 | 2048 | 1024 | 128 | 64 | 32 | 16 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| 16 | 65 536 | 32 768 | 2048 | 2048 | 256 | 128 | 32 | 32 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| 17 | 131 072 | 65 536 | 4096 | 2048 | 512 | 256 | 64 | 32 | 8 | 4 | 4 | 2 |

Результаты расчетов мощностей согласно алгоритму представлены в табл. 1.

Из полученных данных видно, что все мощности $M$, указанные в таблице, являются степенями числа 2 вне зависимости от числа разрядов в блоке и кодового расстояния.

Рассмотрим пример поиска алфавитов максимальной мощности с $d_{min} = 3$ для $n = 3$ и $n = 5$. Выберем в качестве первого элемента слово <000>. В дальнейшем для упрощения записи кодовых слов будем использовать десятичные эквиваленты кодовых слов в фигурных скобках; например {0} вместо <000>. Далее для каждого кодового слова сравним расстояние Хэмминга с заданным $d_{min}$. Если выполняется условие $d(0, j) \geq d_{min}$, где $j$ — кодовое слово, то добавим его в алфавит. Так как элемент {7} содержит наибольшее количество единиц, то не существует других кодовых слов, удовлетворяющих требованию минимального кодового расстояния. Таким образом, в результате действия алгоритма получен кодовый алфавит с параметрами $n = 3$, $M = 2$, $d_{min} = 3$, {0,7} в десятичной записи. Матрица расстояний Хэмминга для $n = 3$ представлена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Матрица расстояний Хэмминга для $n = 3$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | **7** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | **0** | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | **3** |
| 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| 7 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | **0** |

Теперь рассмотрим работу алгоритма для $n = 5$. Матрица расстояний Хэмминга для $n = 5$ представлена в табл. 3. В качестве первого элемента выберем {0}. Далее работа аналогична до момента, когда известны два слова из кодового алфавита {0, 7}. Далее условием включения слова в искомое подмножество является $d(0, j) \geq 3 \wedge d(7, j) \geq 3$. Этому условию соответствует {25}. Добавляем его в кодовый алфавит {0, 7, 25}. Условием для включения следующего элемента будет $d(0, j) \geq 3 \wedge$

$\wedge\, d(7, j) \geq 3 \wedge d(25, j) \geq 3$. Ему соответствует {30}. Теперь кодовый алфавит выглядит следующим образом {0, 7, 25, 30}. Ему соответствует новое условие $d(0, j) \geq 3 \wedge d(7, j) \geq 3 \wedge (25, j) \geq 3 \wedge d(30, j) \geq 3$. Единственный оставшийся элемент {31} ему не соответствует.

В полученном алфавите мощностью $M = 4$ есть кодовые слова, представление которых в десятичной форме совпадает с аналогичным представлением алфавита $M = 2$. Их двоичные представления для $M = 4$ и $M = 2$ соответственно: {00000, 00111, 11010, 11101} и {000, 111}. Добавление нулей (равно как и единиц) в одноименные позиции слов алфавита с меньшим $n$ позволяет получить обладающие аналогичными свойствами слова алфавита с большим $n$. При этом появляется возможность увеличить мощность полученного алфавита, добавив в него новые слова при сохранении $d_{\min}$.

## 2. Алгоритм удвоения мощности кодового алфавита

Для определения зависимости $M$ от $n$ и $d_{\min}$ рассмотрим некоторые частные случаи.

Так, алфавиты первого столбца $d = 1$ представляют собой все возможные кодовые слова заданной длины, и их мощности определяются как $M = 2^n$.

Второй столбец $d = 2$ соответствует способу кодирования «бит четности/нечетности». Для него соотношение $M$ и $n$ выглядит следующим образом:

$$M = 2^{n-1}. \tag{1}$$

Третий столбец соответствует классическому коду Хэмминга [3–6].

Однако не для каждого значения $d$ существует код с уже определенными правилами построения, поэтому рассмотрим иной способ определения зависимости. Для кодов с $M = 2$, у которых минимальное из возможных $n$ (верхние в табл. 1), верно соотношение $n = d$. Эти алфавиты представляют собой произвольное слово длины $d$ и его инверсию [4].

Так как каждый из алфавитов большей мощности в два раза превосходит алфавит меньшей мощности с сохранением минимального кодового расстояния, то существует как минимум один алгоритм увеличения мощности. Для описания предложенного алгоритма введем ряд обозначений и операций.

Определим операцию $A \oplus c = B$, где $A$ — кодовый алфавит, $a_i$ — вектор-строка, являющаяся $i$-м элементом алфавита $A$, $c$ — вектор-строка того же размера, что и $a_i$. Результатом операции будет кодовый алфавит $B$ вида:

$$B = \begin{vmatrix} a_1 \oplus c \\ \vdots \\ a_n \oplus c \end{vmatrix}. \tag{2}$$

Так как операция сложения по модулю два только инвертирует некоторые одноименные биты во всех словах $a_i$, такое действие не изменит свойства кода по достоверности передачи информации.

Под операцией $H(A, B)$ будем понимать матрицу кодовых расстояний:

$$H(A, B) = \begin{pmatrix} d(a_1, b_1) & \cdots & d(a_1, b_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(a_n, b_1) & \cdots & d(a_n, b_n) \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где $A$ и $B$ — равномощные кодовые алфавиты, а их элементы $a_i$ и $b_i$, соответственно, вектор-строки равной длины.

Определим операцию ADD($A$, $B$) = $C$, где $A$ и $B$ — кодовые алфавиты с одинаковым значением $n$, $a_i$ и $b_j$ — их элементы, а кодовый алфавит $C$:

$$C = \begin{vmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{vmatrix}. \tag{4}$$

ТАБЛИЦА 3. Матрица расстояний Хэмминга для $n = 5$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | **7** | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | **25** | 26 | 27 | 28 | 29 | **30** | 31 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | **3** | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | **3** | 3 | 4 | 3 | 4 | **4** | 5 |
| 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 |
| 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 |
| 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 5 | 4 | 4 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| 5 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 |
| **7** | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | **0** | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 5 | **4** | 4 | 3 | 4 | 3 | **3** | 2 |
| 8 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| 9 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 |
| 10 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 |
| 11 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 13 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 14 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 15 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 16 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| 17 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 |
| 19 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 20 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 21 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 22 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 23 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 24 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| **25** | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 | **0** | 2 | 1 | 2 | 1 | **3** | 2 |
| 26 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 27 | 4 | 3 | 3 | 2 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 28 | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 29 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| **30** | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | **0** | 1 |
| 31 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 |

Введем действие $UP(A, B) = D$, где $A$ и $B$ — кодовые алфавиты равной мощности $M$, $a_i(x_1, \ldots, x_k)$ и $b_i(y_1, \ldots, y_n)$ соответственно их элементы с количеством разрядов $k$ и $n$.

$$D = \begin{vmatrix} (x_1 \cdots x_k y_1 \cdots y_n)_1 \\ \vdots \\ (x_1 \cdots x_k y_1 \cdots y_n)_M \end{vmatrix}. \qquad (5)$$

Обозначим матрицу $I_M^e$, где $M$ — количество строк матрицы, $e$ — число столбцов, $x_{Me}$ — элемент матрицы.

$$I_M^e = \begin{vmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & \cdots & x_{Me} \end{vmatrix} x_{Me} = \begin{cases} 0 < \dfrac{M}{2} \\ 1 \ \dfrac{M}{2} \end{cases}. \qquad (6)$$

Далее рассмотрим предпосылки, из которых будем исходить при создании алгоритма. В качестве отправной точки имеем кодовый алфавит $A$ с максимально возможным $M = 2^f$, где $f$ — натуральное число, $n$ и $d_{\min}$. Получим алфавит $B = A \oplus c$. Для этого подберем такое $c$, чтобы получить набольший из возможных $\min(H(A, B))$. Далее составим из них новый алфавит $C = ADD(A, B)$. Кодовые расстояния между элементами алфавита $C$:

$$H(C,C) = \begin{pmatrix} H(A,A) & H(A,B) \\ H(B,A) & H(B,B) \end{pmatrix}. \tag{7}$$

Так как $d(a_i, b_i)$ коммутативно, то $H(A, B) = = H(B, A)$ [1]. Минимальное кодовое расстояние в алфавите $A$ равно $d_{\min}$ по определению. В алфавите $B$ оно также равно $d_{\min}$, поскольку сложение каждого элемента с произвольной константой не изменяет минимальное кодовое расстояние в алфавите. Значит, минимальное кодовое расстояние алфавита $C$ — это $\min(H(A, B))$. $\min(H(A, B)) < d_{\min}$, так как если бы он мог быть ему равен, то мощность алфавита $C$ была бы больше, чем у $A$, а это невозможно по определению $A$. Матрица кодовых расстояний $I^e_{2M}$ выглядит следующим образом:

$$H(I^e_{2M}, I^e_{2M}) = \begin{pmatrix} 0_{11} & \cdots & 0_{1(M/2)} & e_{1(M/2+1)} & \cdots & e_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_{(M/2)1} & \cdots & 0_{(M/2)(M/2)} & e_{(M/2)(M/2+1)} & \cdots & e_{(M/2)M} \\ e_{(M/2+1)1} & \cdots & e_{(M/2+1)(M/2)} & 0_{(M/2+1)(M/2+1)} & \cdots & 0_{(M/2+1)M} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{M1} & \cdots & e_{M(M/2)} & 0_{M(M/2+1)} & \cdots & 0_{MM} \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Места с ненулевыми значениями в этой матрице соответствуют позициям $H(A, B)$ $H(B, A)$. Необходимое значение $e = d_{\min} - \min(H(A,B))$. Учитывая это, получим алфавит $D$ по формуле:

$$D = UP(I^e_{2M}, ADD(A, B)). \tag{9}$$

В общем виде формула для увеличения алфавита удвоенной мощности выглядит так:

$$D = UP(I^e_{2M}, ADD(A, A \oplus c)). \tag{10}$$

## 3. Частные случаи зависимости максимальной мощности кодовых алфавитов от общего числа бит и минимального кодового расстояния

Все нижеописанные зависимости верны для кодов с минимальной избыточностью с наименьшим числом разрядов при одинаковом минимальном кодовом расстоянии и равных мощностях. Для большей наглядности приведем примеры расширения мощностей алфавитов с $d_{\min} = 3$. В качестве начального алфавита используем $A_2$:

$$A_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \tag{11}$$

Теперь получим алфавит со свойствами $M = 4$, $d_{\min} = 3$. Подходящие константы в десятичной записи это $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Для простоты выберем $c = 001$. Тогда $B_2$:

$$B_2 = A_2 \oplus (0,0,1) = \\ = \begin{vmatrix} 0\oplus 0 & 0\oplus 0 & 0\oplus 1 \\ 1\oplus 0 & 1\oplus 0 & 1\oplus 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Тогда $H(A_2, B_2)$:

$$H\left(A_2, B_2\right) = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что:

$$e = d_{\min} - \min\left(H\left(A_2, B_2\right)\right) = 3 - 1 = 2. \quad (14)$$

Значит, искомый алфавит $A_4$ можно получить по формуле:

$$A_4 = UP\left(I_4^2, ADD\left(A_2, B_2\right)\right), \quad (15)$$

где разряды, которые необходимо добавить, определяются как $I_4^2$:

$$I_4^2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

А результат совмещения кодовых алфавитов $APP(A_2, B_2)$:

$$ADD\left(A_2, B_2\right) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Полученный таким образом код $A_4$ представляет собой:

$$A_4 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Теперь рассмотрим более общий случай удвоения алфавитов мощностью $M = 2$ при произвольном $d_{\min}$. Обозначим такой алфавит как $E_2$. Количество разрядов для него $n = d_{\min}$. Существует $2^n$ возможных вариантов алфавита, однако все они могут быть сведены путем операций, не изменяющих кодовое расстояние и число бит, таких как перестановка строк, столбцов, инверсия разрядов, к алфавиту из двух кодовых слов, представляющих собой $n$ нулей и $n$ единиц. Матрица кодовых расстояний такого алфавита:

$$H\left(E_2, E_2\right) = \begin{vmatrix} 0 & d \\ d & 0 \end{vmatrix}. \quad (19)$$

Далее необходимо выбрать такую константу $c$, чтобы максимизировать $\min H(E2, E2 \oplus c)$. Данному условию будут удовлетворять все константы, в которых число единиц равно половине кодового расстояния. Тогда:

$$H\left(E_2, E_2 \oplus c\right) = \begin{Vmatrix} \left\lfloor \frac{d}{2} \right\rfloor & \left\lceil \frac{d}{2} \right\rceil \\ \left\lceil \frac{d}{2} \right\rceil & \left\lfloor \frac{d}{2} \right\rfloor \end{Vmatrix}. \quad (20)$$

Под $\lfloor\ \rfloor$ и $\lceil\ \rceil$ тут понимается округление до целого числа вниз и вверх соответственно. Число разрядов, которое необходимо добавить, чтобы сохранить минимальное кодовое расстояние $e = d_{\min} - \text{lfloor}\,\frac{d}{2}\,\text{rfloor}$. Следовательно, минимальное $n$ для кодов с наименьшей избыточностью с $M = 4$:

$$n = d_{\min} + e = 2d_{\min} - \left\lfloor \frac{d_{\min}}{2} \right\rfloor = d_{\min} + \left\lceil \frac{d_{\min}}{2} \right\rceil. \quad (21)$$

Продолжая предыдущие операции, получим алфавит $E_8$ путем удвоения мощности алфавита $E_4$. Для этого определим вид подходящей константы:

$$E_4 = \begin{vmatrix} 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{vmatrix}. \quad (22)$$

Для кодовых расстояний больше 2 в $E_4$ существует три вида разрядов. Для того чтобы максимизировать $\min(H(E4, E4 \oplus c))$, нужно инвертировать половину разрядов каждого вида. Первая группа представляет собой разряд, который был добавлен для сохранения кодового расстояния. Их количество — $e$. Вторая группа — это те разряды, которые не инвертировались в результате $E_2 \oplus c$. Это значит, что их $\frac{d_{\min}}{2}$. Третья группа — это разряды, которые находятся на позициях, где происходила инверсия в результате $E_2 \oplus c$. Они присутствуют в алфавите $E_2$ в количестве $\frac{d_{\min}}{2}$.

Значит, количество разрядов, которое необходимо добавить для сохранения $d_{\min}$:

$$e = d_{\min} - 2\left\lfloor \frac{\left\lceil \frac{d_{\min}}{2} \right\rceil}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{d_{\min}}{2} \right\rfloor}{2} \right\rfloor. \quad (23)$$

Отсюда следует, что минимальное необходимое число разрядов для кодов с $M = 8$:

$$n = d + \left( d - \left\lfloor \frac{d}{2} \right\rfloor \right) + \left( d - \left\lfloor \frac{\left\lceil \frac{d}{2} \right\rceil}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\left\lceil \frac{d}{2} \right\rceil}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{d}{2} \right\rfloor}{2} \right\rfloor \right) = 2d + \left\lceil \frac{d}{2} \right\rceil - 2\left\lfloor \frac{\left\lceil \frac{d}{2} \right\rceil}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{d}{2} \right\rfloor}{2} \right\rfloor. \quad (24)$$

Приведем пример удвоения мощности алфавита со свойствами $M = 4$, $d_{\min} = 3$, $n = 5$. Примем $c = \{01010\}$. Тогда:

$$B_4 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (25)$$

$$H\left(A_4, B_4\right) = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 3 & 3 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

$$e = 3 - 2 = 1. \quad (27)$$

$$A_8 = UP\left(I_8^1, ADD\left(A_4, B_4\right)\right). \quad (28)$$

$$A_8 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (29)$$

## 4. Метод определения информационных и контрольных разрядов в кодах с наименьшей избыточностью

Выше описан метод определения максимальной мощности множества кодовых комбинаций с заданными длиной и кодовым расстоянием, а также итеративного удвоения указанной мощности. Однако решение такой задачи является только средством достижения более важного и прикладного результата — синтеза правил построения разделимых кодов, обладающих соответствующими свойствами. Под синтезом понимается

выделение в получившемся кодовом алфавите $A_i$ информационных и контрольных разрядов.

Опишем разряды в вышеописанных кодах. Для этого определим информационные разряды как:

$$i_j^k = \begin{vmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \end{vmatrix}, \qquad (30)$$

где $\tilde{o}_j = \left\lfloor \frac{j-1}{k} \right\rfloor \bmod k.$

На начальном этапе составления кода имеется несколько разрядов вида $I_2^1$. В тех позициях, где значение константы равно «0», в новом коде также будут разряды вида $i_4^1$:

$$i_4^1 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}. \qquad (31)$$

Добавленные разряды в результате $UP(I_4, C)$ будут разрядами вида $i^2$. Те же разряды, которые инвертировались константой, возможно вычислить по формуле $k^{12} = i^1 \oplus i^2$.

Определение разрядов при дальнейших увеличениях будет аналогично: если разряд не инвертировался константой, то он определяется так же, как и ранее, добавленные разряды будут представлять из себя информационные разряды вида $i^{k+1}$, где $k$ — номер старшего информационного разряда. В случае инверсии разряда его значение определяется как ранее известное, сложенное по модулю два с $i^{k+1}$. Для наглядности приведем пример в табл. 4.

Многие известные классы двоичных блочных кодов будут совпадать с кодами, которые можно получить описанным в статье методом, по мощности и минимальному кодовому расстоянию. Некоторые из этих кодов являются циклическими, а значит, для их кодирования/декодирования применяются циклические алгоритмы. Для

ТАБЛИЦА 4. Пример определения принадлежности разрядов

| Номера разряда | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Разряды | | | | $i^1$ | $i^1$ | $i^1$ |
| Константа | | | | 0 | 0 | 1 |
| Разряды | | $i^2$ | $i^2$ | $i^1$ | $i^1$ | $i^1 \oplus i^2$ |
| Константа | | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Разряды | $i^3$ | $i^2$ | $i^2 \oplus i^3$ | $i^1$ | $i^1 \oplus i^3$ | $i^1 \oplus i^2$ |

описанных в статье кодов контрольные разряды определяются как сложение по модулю 2 нескольких информационных. При использовании аппаратных методов кодирования/декодирования или в случае использования ПЛИС (программируемых логических интегральных схем) эти операции можно осуществить за один такт, что может дать выигрыш в скорости.

## Заключение

Метод удвоения мощности кодовых алфавитов, описанный в статье, применим к любому двоичному блочному коду. Новый код, полученный таким образом, гарантированно сохранит минимальное кодовое расстояние, однако при использовании произвольного кодового алфавита в результате удвоения необязательно получится код с наименьшей избыточностью.

Предложенный в статье метод позволяет получить коды с наименьшей избыточностью с произвольным кодовым расстоянием и мощностью $M = 2^f$, где $f$ — натуральное число, путем рекурсивно использования метода, на кодовом алфавите, представляющем собой произвольное слово длинной $d_{\min}$ и его инверсию.

Путем анализа полученных таким образом кодов с наименьшей избыточностью могут быть выявлены правила построения их разрядов, что даст возможность их использования в системах связи и функционального контроля, в том числе и в устройствах автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте [7–10].

На основании исследования метода удвоения мощности были получены аналитические зависимости минимального необходимого числа разрядов от минимального кодового расстояния для алфавитов с мощностями 4 и 8.

Описанный в статье подход позволяет проводить дальнейшие исследования для алфавитов других мощностей.

## Библиографический список

1. Hamming R. W. Error detecting and error correcting codes / R. W. Hamming // The Bell system technical journal. — 1950. — Vol. 29. — Iss. 2. — DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.

2. Пронин Г. Ю. Алгоритм генерации условно оптимальных кодов / Г. Ю. Пронин, Е. А. Волков, Ю. В. Иванов и др. // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. — 2022. — № 2. — С. 96–98.

3. Manoj S. G. Diagonal Hamming Based Multi-Bit Error Detection and Correction Technique for Memories / S. G. Manoj, A. K. Mohan, N. L. Sri Ganesh et al. // International Conference on Communication and Signal Processing. — July 28–30, 2020. — DOI: 10.1109/ICCSP48568.2020.9182249.

4. Van W. J. Effectiveness of Hamming Single Error Correction Codes Under Harsh Electromagnetic Disturbances / W. J. Van, J. Lannoo, J. Vankeirsbilck et al. // International Symposium on Electromagnetic Compatibility. — August 27–30, 2018. — DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8485176.

5. Tshagharyan G. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications / G. Tshagharyan, G. Hatutyunyan, S. Shoukourian et al. // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017.

6. Musayelyan R. Hamming Distance Based Data Correction Combined With Low Power XOR Circuit / R. Musayelyan // Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021.

7. Sridevi N. Implementation of Error Correction Techniques in Memory Applications / N. Sridevi, K. Jamal, K. Mannem // 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication. — April 8–10, 2021. — DOI: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418432.

8. Tolentino L. K. S. Overhead Interspersing of Redundancy Bits Reduction Algorithm by Enhanced Error Detection Correction Code / L. K. S. Tolentino, I. C. Valenzuela, R. O. Serfa Juan // Journal of Engineering Science & Technology Review. — 2019. — T. 12. — Iss. 2.

9. Shahariar Parvez A. H. M. Design and implementation of hamming encoder and decoder over FPGA / A. H. M. Shahariar Parvez et al. // International Conference on Computer Networks and Communication Technologies: ICCNCT 2018. — Springer Singapore, 2019. — Pp. 1005–1022.

10. Panem C. Polynomials in Error Detection and Correction in Data Communication System / C. Panem, V. Gad, R. Gad // Coding Theory. — 2019. — P. 29.

Дата поступления: 14.04.2023
Решение о публикации: 20.05.2023

**Контактная информация:**
БЛЮДОВ Антон Александрович — канд. техн. наук, доц.; blyudov@pgups.ru
ПИВОВАРОВ Дмитрий Вячеславович — канд. техн. наук, доц.; pivovarov.d.v.spb@gmail.com
ПРОНИН Георгий Юрьевич — аспирант; georgiy3pronin@gmail.com

# Power Distribution of Codes with the Lowest Alphabet Redundancy Depending on the Number of Bits and Code Distance

**A. A. Blyudov, D. V. Pivovarov, G. Yu. Pronin**

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

**For citation:** Blyudov A. A., Pivovarov D. V., Pronin G. Yu. Power Distribution of Codes with the Lowest Alphabet Redundancy Depending on the Number of Bits and Code Distance // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 365–375. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-365-375

**Summary**
**Purpose:** To investigate the dependence of the maximum power of codes on the number of digits and the minimum code distance; to find an approach to determine the optimal rules for constructing the check vector of a separable code from the point of view of ensuring minimal redundancy with a given reliability of message transmission. **Methods:** Computer simulation has been used to conduct experimental studies. For theoretical studies, the method of analytical review, graph theory, and coding theory have been applied. **Results:** Theoretical and experimental studies have obtained certain specific cases of power distribution for code alphabets with a given Hamming distance for various constant lengths, generated using the previously described algorithm. A method for doubling the power of arbitrary binary codes is proposed and described, as well as a method for obtaining codes with the least redundancy of powers $M=2^f$, where $f$ is a natural number for a predetermined minimum code distance by recursively using the method proposed in the article. **Practical significance:** An algorithm has been developed for doubling the power of the code alphabet while maintaining the required reliability of data transmission. A technique for analyzing the resulting matrices of code vectors is obtained in order to determine the rules for calculating check bits without using cyclic algorithms.

**Keywords:** Anti-jamming coding, least redundant codes, code alphabet, code word, Hamming distance, separable codes.

## References

1. Hamming R. W. Error detecting and error correcting codes. The Bell system technical journal. 1950, vol. 29, Iss. 2. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.

2. Pronin G. Yu., Volkov E. A., Ivanov Yu. V. Algoritm generatsii uslovno optimal'nykh kodov [Algorithm for generating conditionally optimal codes]. *Transport: problemy, idei, perspektivy* [Transport: problems, ideas, prospects]. 2022, Iss. 2, pp. 96–98. (In Russian)

3. Manoj S. G., Mohan A. K., Sri Ganesh N. L. et al. Diagonal Hamming Based Multi-Bit Error Detection and Correction Technique for Memories. International Conference on Communication and Signal Processing. July 28–30, 2020. DOI: 10.1109/ICCSP48568.2020.9182249.

4. Van W. J., Lannoo J., Vankeirsbilck J. et al. Effectiveness of Hamming Single Error Correction Codes Under Harsh Electromagnetic Disturbances. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. August 27–30, 2018. DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8485176.

5. Tshagharyan G., Hatutyunyan G., Shoukourian S. et al. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017.

6. Musayelyan R. Hamming Distance Based Data Correction Combined With Low Power XOR Circuit. Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021.

7. Sridevi N., Jamal K., Mannem K. Implementation of Error Correction Techniques in Memory Applications. 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication. April 8–10, 2021. DOI: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418432.

8. Tolentino L. K. S., Valenzuela I. C., Serfa R. O. Juan Overhead Interspersing of Redundancy Bits Reduction Algorithm by Enhanced Error Detection Correction Code. Journal of Engineering Science & Technology Review. 2019, vol. 12, Iss. 2.

9. Shahariar Parvez A. H. M. et al. Design and implementation of hamming encoder and decoder over FPGA. International Conference on Computer Networks and Communication Technologies: ICCNCT 2018. Springer Singapore, 2019, pp. 1005–1022.

10. Panem C., Gad V., Gad R. Polynomials in Error Detection and Correction in Data Communication System. Coding Theory, 2019, p. 29.

Received: April 14, 2023
Accepted: May 20, 2023

**Author's information:**
Anton. A. BLYUDOV — PhD in Engineering, Associate Professor; blyudov@pgups.ru
Dmitry V. PIVOVAROV — PhD in Engineering, Associate Professor; pivovarov.d.v.spb@gmail.com
Georgy Yu. PRONIN — Postgraduate Student; georgiy3pronin@gmail.com

УДК 539.3

# Изгиб секторальной пластины: использование систем компьютерной алгебры

**Д. П. Голоскоков[1], А. В. Матросов[2]**

[1]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** *Голоскоков Д. П., Матросов А. В.* Изгиб секторальной пластины: использование систем компьютерной алгебры // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 376–384. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-376-384

## Аннотация

**Цель:** Численно-аналитическим методом исследовать напряженно-деформированное состояние тонкой однородной изотропной пластины в форме сектора. Рассмотреть вопрос о возможности использования систем компьютерной алгебры (СКА) (computer algebra system, CAS) для расчета секторальных пластин, работающих на изгиб от поперечной нагрузки. Показать эффективность применения одной из таких СКА на примере системы Maple для выполнения расчетов по методу Ритца — выполнение аналитических преобразований при вычислении интеграла, определяющего функционал полной потенциальной энергии, формирование и решение основной разрешающей системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных числовых коэффициентов в формуле, аппроксимирующей прогиб пластины, визуализация полученного решения. **Методы:** Используется прямой метод решения вариационной задачи о минимизации функционала полной потенциальной энергии деформации тонкой однородной изотропной пластины в форме сектора — метод Ритца. Решение строится в форме ряда по базисным функциям. В качестве базисных функций выбираются полиномиальные функции, точно удовлетворяющие всем граничным условиям. **Результаты:** Получено приближенное численно-аналитическое решение задачи изгиба секторальной пластины в форме четверти круга, защемленной по контуру и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой. Продемонстрирована эффективность использования системы аналитических вычислений Maple для решения задачи изгиба секторальной пластины вариационным методом Ритца. Показано, что полученное решение быстро сходится как для прогиба, так и для изгибающих моментов и напряжений. **Практическая значимость:** Предложенный в статье алгоритм решения задач изгиба секторальных пластин может быть рекомендован к практическому использованию при определении напряженно-деформированного состояния таких пластин.

**Ключевые слова:** Секторальная пластина, изгиб пластины, функционал полной потенциальной энергии пластины, метод Ритца, системы компьютерной алгебры.

## Введение

На сегодняшний день в математических исследованиях широко используются так называемые системы компьютерной алгебры (СКА) (иногда их называют системами символьных (аналитических) вычислений или, реже, компьютерной математики).

Одной из первых работ по применению компьютерной алгебры для анализа свободных колебаний пластин методом Рэлея — Ритца является

работа [1]. В статье [2] символьные вычисления в тригонометрических рядах использовались для решения задач небесной механики.

В работах [3–5] решены различные задачи статики и динамики прямоугольных, круговых и секторальных пластинок с использованием различных СКА.

Познакомиться с современным состоянием внедрения в практику строительной механики СКА можно в работе [6].

Среди современных СКА можно выделить группу наиболее развитых пакетов: MathCAD, Reduce, Mathematica, Maple, Macsyma, Derive и Axiom. Среди всех перечисленных СКА несомненными лидерами являются пакеты Maple и Mathematica.

Пакет Maple позволяет эффективно решать задачи из многих разделов современной математики и математических задач из других областей [7–9]. Пакет работает на многих моделях ПК (IBM-совместимых, Macintosh и других типах ЭВМ). Весьма эффективным в ряде случаев оказывается использование его в сочетании с таким пакетом, как MatLab.

Основания аналитических методов применительно к задачам расчета пластин были заложены русскими учеными С. П. Тимошенко [10], И. Г. Бубновым [11].

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций часто связан с большими математическими трудностями. Использование СКА позволяет эффективно преодолеть эти трудности [12–15].

В данной работе задача прочностного анализа НДС секторальной пластины успешно решается в пакете *Maple*.

## Математическая модель

Рассмотрим упругое равновесие плоской однородной изотропной пластинки постоянной толщины $h$. Обозначим прогиб срединной поверхности пластинки $w(x, y)$, интенсивность поперечной нагрузки $q(x, y)$.

Как известно, полная потенциальная энергия такой пластины:

$$U = \iint_{\Omega} F(x, y)\, dxdy. \tag{1}$$

В формуле (1) интеграл распространен на плоскую область Ω, ограниченную контуром пластины Г, $F(x,y)$ — плотность полной потенциальной энергии пластины:

$$F(x, y) = \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)}\left\{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 + \right.$$
$$\left. +2(1-\nu)\left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)\right]\right\} -$$
$$- q(x, y)\, w(x, y).$$

Рассматривается задача о минимуме полной потенциальной энергии пластины (1). Требуется найти непрерывную в области Ω функцию $w(x, y)$ вместе с частными производными до четвертого порядка, принимающую на контуре Г заданные значения и доставляющую интегралу (1) минимальное значение.

Станем рассматривать граничные условия жесткого защемления контура:

$$w\big|_{\Gamma} = 0, \left.\frac{\partial w}{\partial n}\right|_{\Gamma} = 0. \tag{2}$$

Плотность полной потенциальной энергии пластины в частном случае жестко защемленного контура упрощается и имеет вид:

$$F(x, y) = \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 -$$
$$- q(x, y)\, w(x, y). \tag{3}$$

Будем исследовать изгиб пластины методом Ритца. Выбираем координатные функции $\varphi_{i,j}(x, y)$, точно

удовлетворяющие граничным условиям защемления на контуре Г. Задаем прогиб пластины в виде:

$$w(x,y)=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}c_{i,j}\varphi_{i,j}(x,y). \qquad (4)$$

После подстановки формул (3), (4) в (1) и вычисления интеграла по области Ω получим функцию $M \cdot N$ переменных относительно неизвестных коэффициентов $c_{i,j}$. Необходимое условие минимума функции $U$ приводит к системе $M \cdot N$ линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных $c_{i,j}$:

$$\frac{\partial U}{\partial c_{i,j}}=0, i=1.2\ldots.M; j=1,2,\ldots,N. \qquad (5)$$

**Числовой пример**

Рассмотрим упругое равновесие плоской однородной изотропной пластинки постоянной толщины $h$, имеющей в плане форму сектора (четверть круга радиуса $R$) и жестко защемленной по контуру (рис. 1).

Контур пластины задается уравнениями:

$$R^2-x^2-y^2=0, y=0, x=0.$$

Выбираем базисные функции, удовлетворяющие граничным условиям защемления на контуре:

$$\varphi_{i,j}(x,y)=\left(R^2-x^2-y^2\right)^2 y^2x^2x^{i-1}y^{j-1}.$$

Функционал энергии (1) в этом случае может быть вычислен, например, так:

$$U=\int_0^{\sqrt{R^2-x^2}}dy\int_0^R F(x,y)\,dx \qquad (6)$$

или в полярных координатах:

$$U=\int_0^R\int_0^{\frac{\pi}{2}}F(r\cos\theta, r\sin\theta)\,rd\theta dr, \qquad (7)$$

где $F(x, y)$ определяется формулой (3).

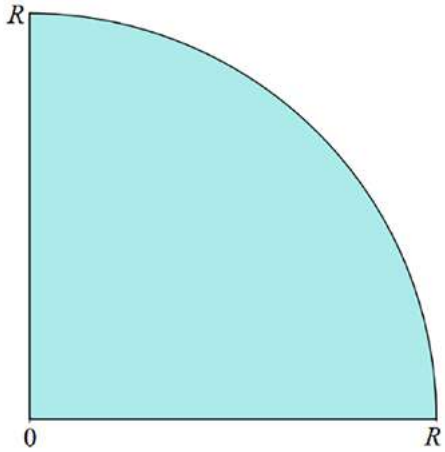



Рис. 1. Секторальная пластина

Расчет выполнялся при следующих параметрах пластины: модуль Юнга $E = 2{,}2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$. Толщина пластины $h = 0{,}01$ м. Радиус пластины $R = 1$ м. Поперечная нагрузка — равномерное давление $q(x, y) = 10$ кН.

Отметим, что вычисление по формуле (6) предпочтительней по сравнению с формулой (7) с точки зрения временных затрат — по формуле (6) время счета при $M = N = 3$ составляет 6,8 секунды, а по формуле (7) — 11,9 секунды; при $M = N = 5$ соответственно 371,5 секунды и 71,3 секунды.

Все вычисления выполнялись в системе символьных вычислений Maple.

Отобразим полученный результат на графиках. Эпюры прогиба в форме контурных линий (рис. 2).

Эпюры прогибов в центральном сечении при $\theta=\frac{\pi}{4}$ (рис. 3).

Сравнение результатов (рис. 2, 3) при различных значениях $M$ и $N$ показывает, что для вычисления прогиба достаточно ограничиться в формуле (4) значениями $M = N = 3$.

Эпюры радиального изгибающего момента в форме контурных линий (рис. 4).

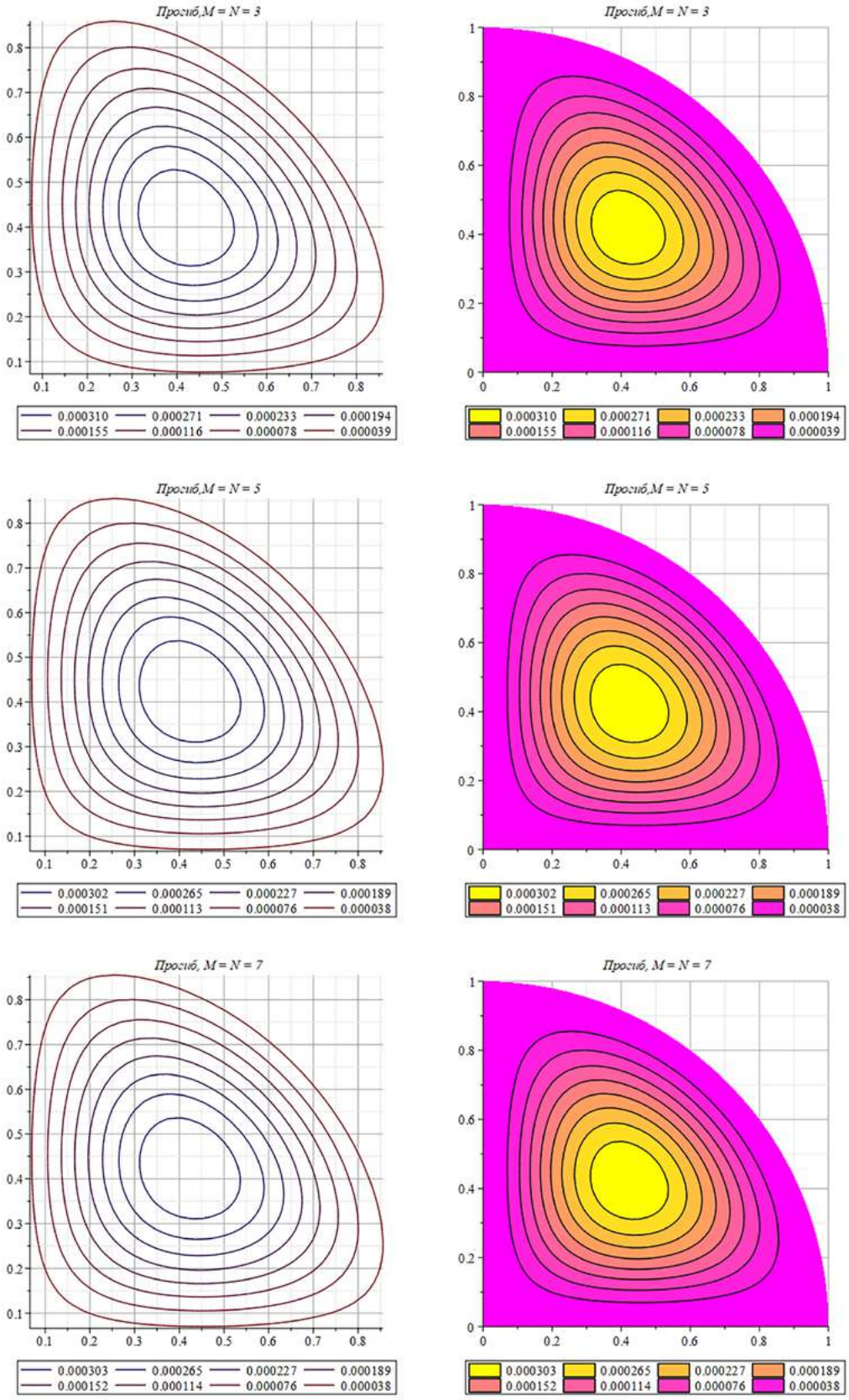

Прогиб,M = N = 3
0.000310 0.000271 0.000233 0.000194
0.000155 0.000116 0.000078 0.000039
Прогиб,M = N = 3
0.000310 0.000271 0.000233 0.000194
0.000155 0.000116 0.000078 0.000039
Прогиб,M = N = 5
0.000302 0.000265 0.000227 0.000189
0.000151 0.000113 0.000076 0.000038
Прогиб,M = N = 5
0.000302 0.000265 0.000227 0.000189
0.000151 0.000113 0.000076 0.000038
Прогиб, M = N = 7
0.000303 0.000265 0.000227 0.000189
0.000152 0.000114 0.000076 0.000038
Прогиб, M = N = 7
0.000303 0.000265 0.000227 0.000189
0.000152 0.000114 0.000076 0.000038

Рис. 2. Прогиб

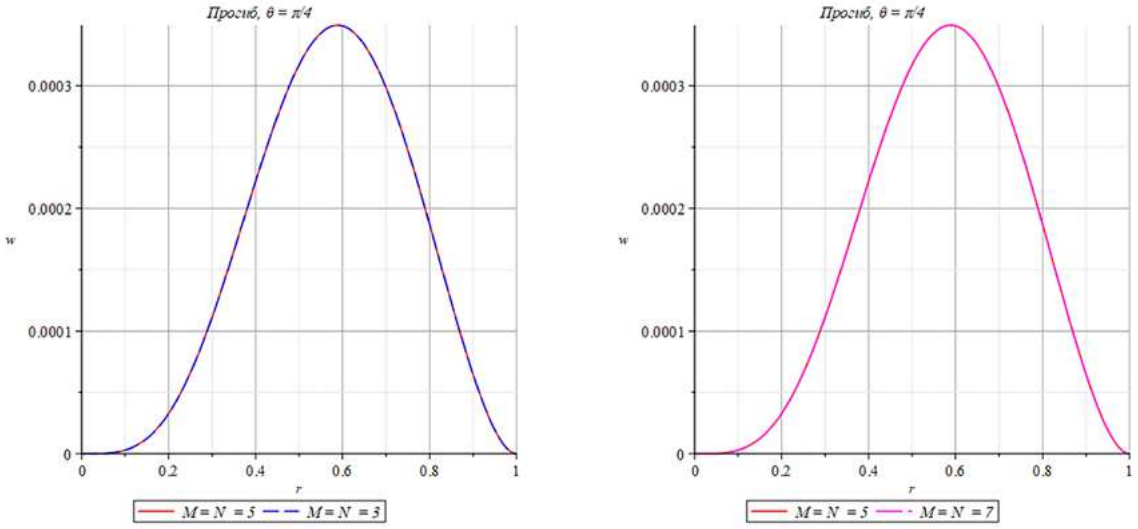



Рис. 3. Прогиб в сечении $\theta = \frac{\pi}{4}$

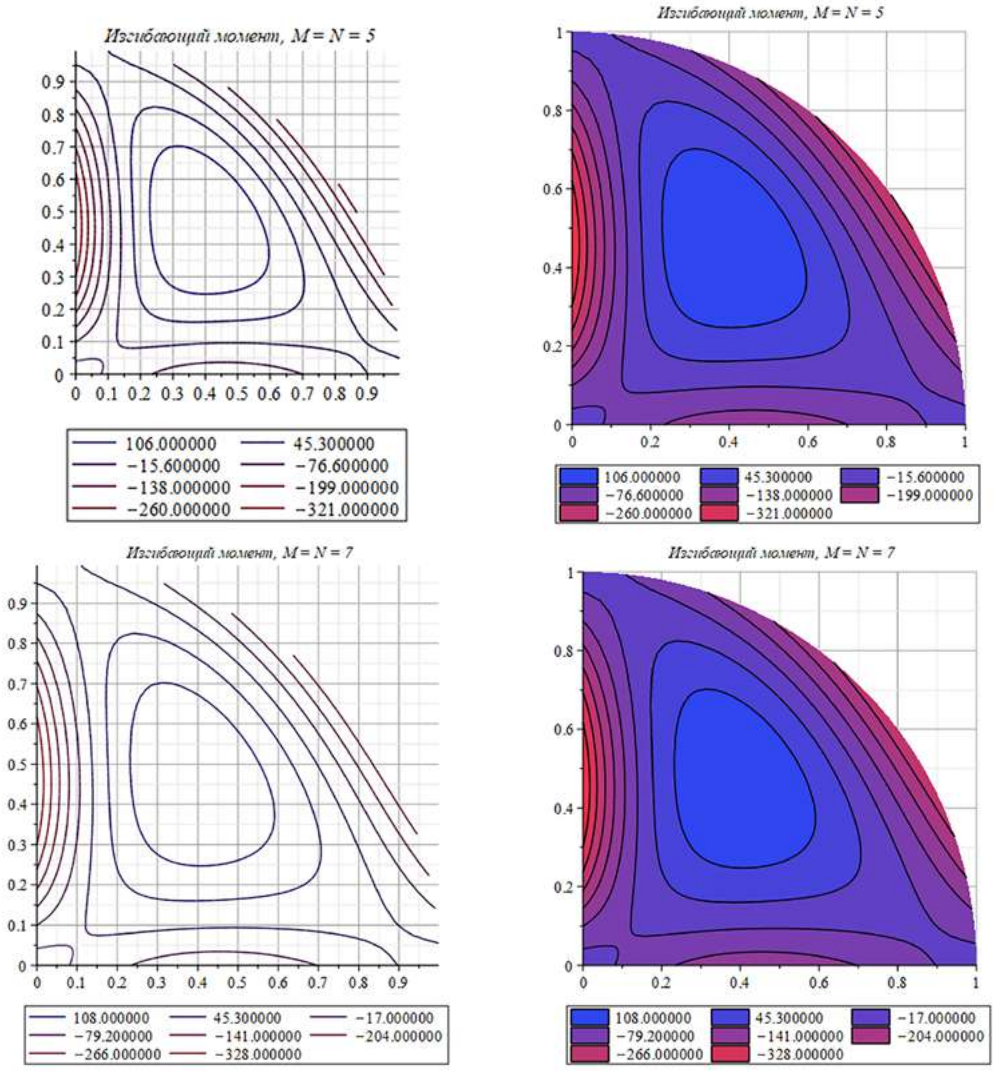



Рис. 4. Радиальный изгибающий момент

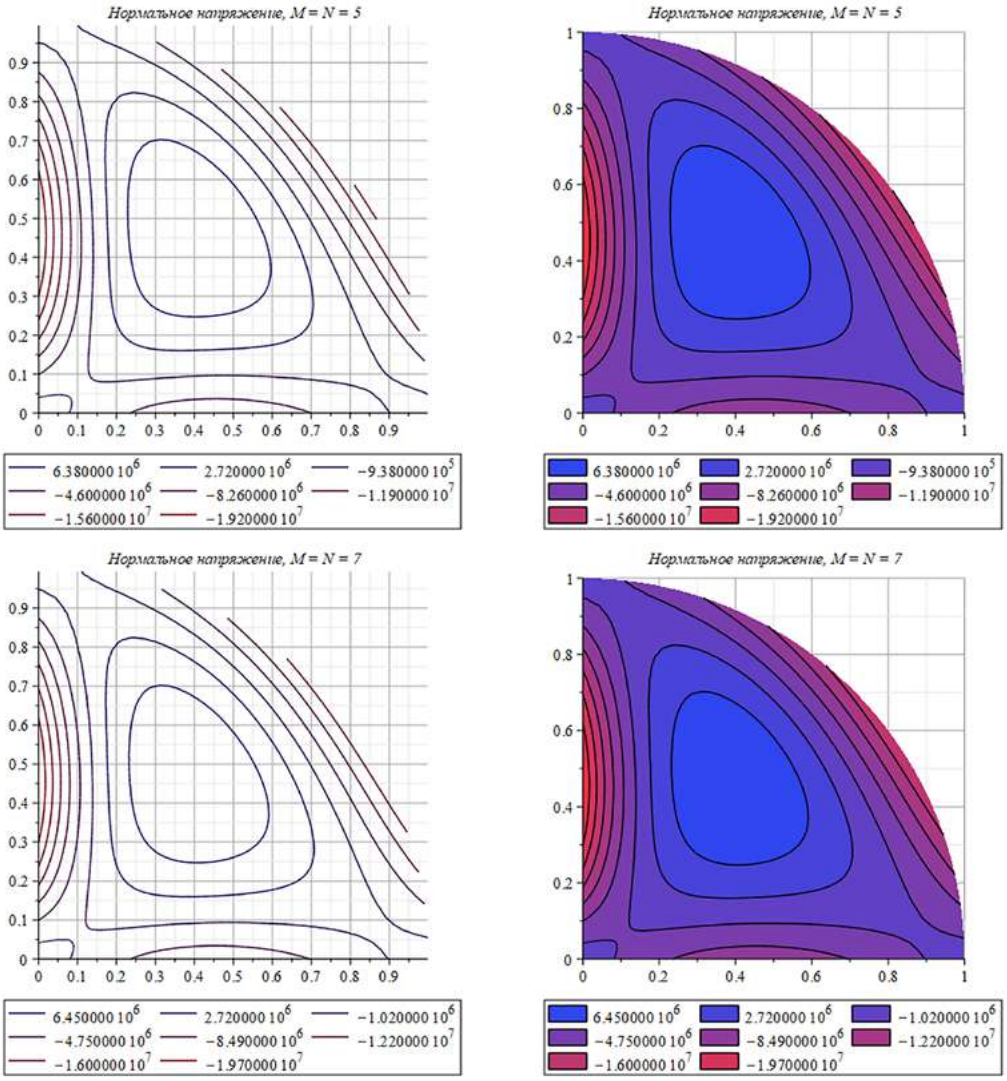



Рис. 5. Максимальное радиальное нормальное напряжение

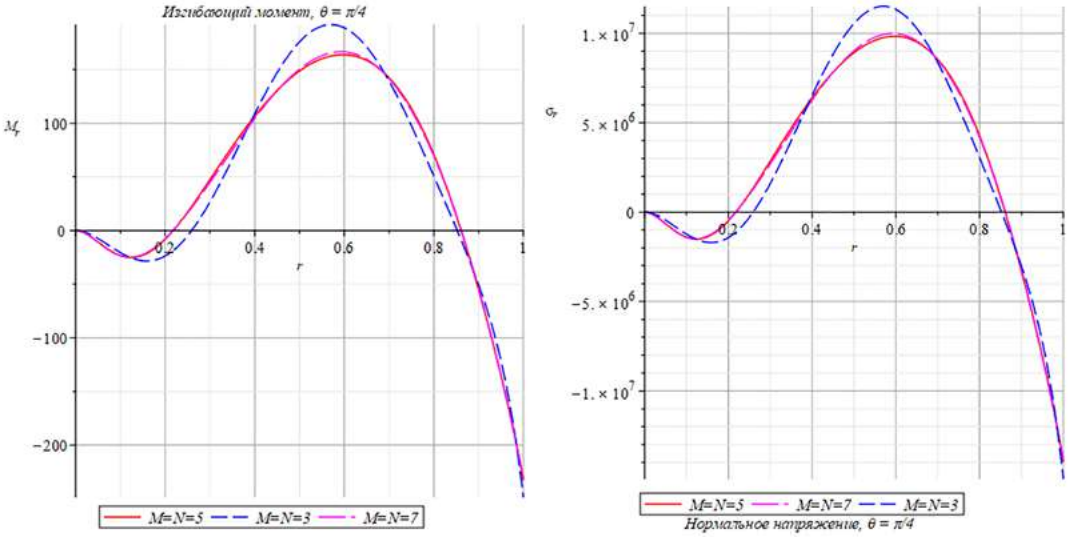



Рис. 6. Радиальный изгибающий момент и максимальное радиальное нормальное напряжение в сечении $\theta = \frac{\pi}{4}$

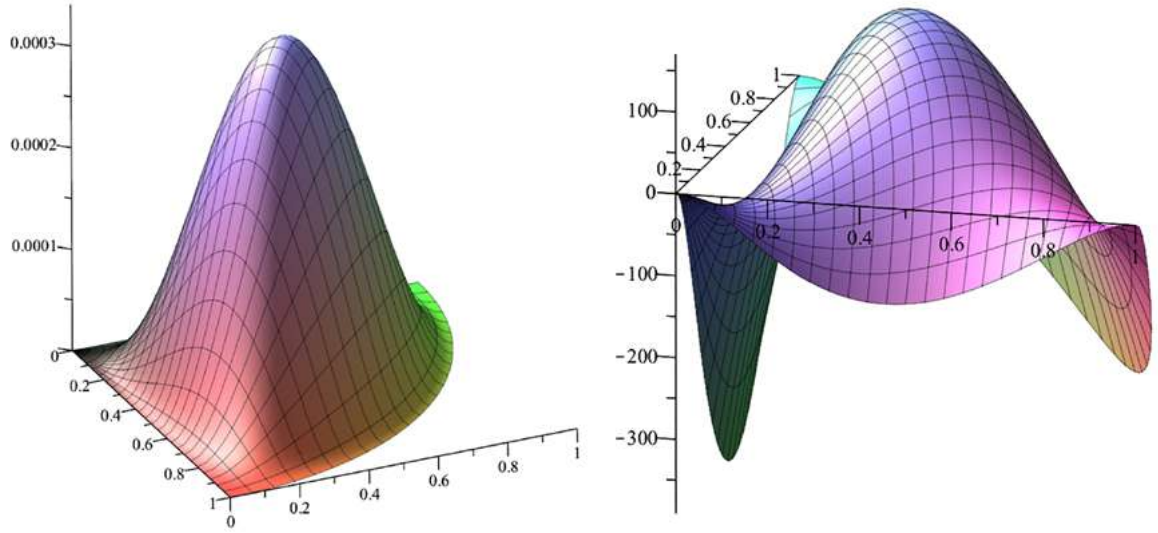



Рис. 7. Эпюра прогиба при $M = N = 5$ и эпюра радиального изгибающего момента при $M = N = 7$

Эпюры радиального максимального нормального напряжения в форме контурных линий (рис. 5).

Эпюры радиального изгибающего момента и максимального радиального нормального напряжения в центральном сечении при $\theta = \frac{\pi}{4}$ (рис. 6).

Сравнение результатов (рис. 4–6) при различных значениях $M$ и $N$ показывает, что для вычисления изгибающего момента и максимального нормального напряжения достаточно ограничиться в формуле (4) значениями $M = N = 5$.

Пространственные эпюры прогиба и радиального изгибающего момента показаны на рис. 7.

## Заключение

Численные расчеты показывают достаточно быструю сходимость полученного решения в виде (4): при $M = N = 3$ формула (4) дает хорошее приближение для прогиба. Таким образом, использование решения в виде (4) при $M = N = 3$ оправдано для определения прогибов.

Для вычисления изгибающих моментов и нормальных напряжений, полученных на основе формулы (4), достаточно удерживать $M = N = 5$.

## Библиографический список

1. Noor A. K. Computerized symbolic manipulation in structural mechanics-progress and potential / A. K. Noor, C. M. Andersen // Computers and Structures. — 1979. — Iss. 10. — Pp. 95–118.

2. Brumberg V. A. Specialized celestial mechanics systems for symbolic manipulation / V. A. Brumberg, S. V. Tarasevich, N. N. Vasiliev // Celestial Mechanics. — 1989. — Iss. 45. — Pp. 149–162.

3. Pavlovic M. N. Computers and structures: non-numerical applications / M. N. Pavlovic, E. J. Sapountzakis // Computers & Structures. — 1986. — Vol. 24. — Iss. 3. — Pp. 455–474.

4. Eisenberger M. Application of Symbolic Algebra to the Analysis of Plates on Variable Elastic Foundation / M. Eisenberger // Symbolic Computation — 1990. — Iss. 9. — Pp. 207–213.

5. Ye Z. Application of Maple V to the nonlinear vibration analysis of circular plate with variable thickness / Z. Ye // Computers and Structures. — 1999. — Iss. 71. — Pp. 481–488.

6. Pavlovic M. N. Symbolic computation in structural engineering / M. N. Pavlovic // Computers and Structures. — 2003. — Iss. 81. — Pp. 2121–2136.

7. Кирсанов М. Н. Maple и Maplet. Решения задач механики / М. Н. Кирсанов. — СПб.: Лань, 2012. — 512 с.

8. Голоскоков Д. П. Построение базиса для одномерных краевых задач в системах символьных вычислений / Д. П. Голоскоков // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. — 2017. — **Вып**. 1. — С. 77–87.

9. Кирсанов М. Н. Математика и программирование в Maple / М. Н. Кирсанов. — М.: IPR MEDIA, 2020. — 164 с.

10. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. — М.: Наука, 1966.

11. Бубнов И. Г. Труды по теории пластин / И. Г. Бубнов. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.

12. Голоскоков Д. П. Изгиб ребристой пластины при сложном нагружении / Д. П. Голоскоков, А. В. Матросов // Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2021. — Т. 17. — Вып. 2. — С. 120–130.

13. Голоскоков Д. П. Метод начальных функций в расчете изгиба защемленной по контуру тонкой ортотропной пластинки / Д. П. Голоскоков, А. В. Матросов // Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2021.— Т. 17. — Вып. 4. — С. 330–344.

14. Goloskokov D. P. Bending of clamped orthotropic thin plates: polynomial solution / D. P. Goloskokov, A. V. Matrosov // Mathematics and Mechanics of Solids. — 2022. — Vol. 27(11). — Pp. 2498–2509. — DOI: 10.1177/10812865221075280.

15. Алцыбеев Г. О. Метод суперпозиции в задаче изгиба защемленной по контуру тонкой изотропной пластинки / Г. О. Алцыбеев, Д. П. Голоскоков, А. В. Матросов // Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2022. — Т.18. — Вып. 3. — С. 347–364.

Дата поступления: 17.03.2023
Решение о публикации: 10.04.2023

**Контактная информация:**
ГОЛОСКОКОВ Дмитрий Петрович — д-р техн. наук, проф.; dpg1954@mail.ru
МАТРОСОВ Александр Васильевич — д-р физ.-мат. наук, доц.; avmatrosov@mail.ru

## Sector Plate Bending: Using Computer Algebra Systems

**D. P. Goloskokov[1], A. V. Matrosov[2]**

[1]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[2]St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Embankment., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Goloskokov D. P., Matrosov A. V. Sector Plate Bending: Using Computer Algebra Systems // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 376–384. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-376-384

## Summary

**Purpose:** To investigate the stress-strain state of a thin homogeneous isotropic plate in the form of a sector by numerical-analytical method. To consider the possibility of using computer algebra systems (CAS) to calculate sectoral plates operating under bending due to a transverse load. To demonstrate the effectiveness of applying one of these CASs through the example of the Maple system for calculations using the Ritz method — performing analytical transformations when calculating the integral that determines the total potential energy functional, forming and solving the main resolving system of linear algebraic equations with respect to unknown numerical coefficients in the formula approximating the deflection of the plate, visualization of the obtained solution. **Methods:** A direct method is used to solve the variational problem of minimizing the functional of the total potential energy of deformation of a thin homogeneous isotropic plate in the form of a sector — the Ritz method. The solution is constructed in the form of a series in terms of basis functions. As basis functions, polynomial functions are chosen that exactly satisfy all boundary conditions. **Results:** An approximate numerical-analytical solution has been obtained for the problem of bending a sectoral plate in the form of a quarter of a circle, clamped along the contour and loaded with a uniformly distributed load. The effectiveness of using the Maple analytical computing system for solving the problem of bending a sectoral plate by the variational Ritz method is demonstrated. It is shown that the resulting solution quickly converges both for

deflection and for bending moments and stresses. **Practical significance:** The algorithm proposed in the article for solving the problems of bending sectoral plates can be recommended for practical use in determining the stress-strain state of such plates.

**Keywords:** Sectoral plate, plate bending, plate total potential energy functional, Ritz method, computer algebra systems.

## References

1. Noor A. K., Andersen C. M. Computerized symbolic manipulation in structural mechanics-progress and potential. Computers and Structures. 1979, Iss. 10, pp. 95–118.

2. Brumberg V. A., Tarasevich S. V., Vasiliev N. N. Specialized celestial mechanics systems for symbolic manipulation. Celestial Mechanics, 1989, Iss. 45, pp. 149–162.

3. Pavlovic M. N., Sapountzakis E. J. Computers and structures: non-numerical applications. Computers & Structures, 1986, vol. 24, Iss. 3, pp. 455–474.

4. Eisenberger M. Application of Symbolic Algebra to the Analysis of Plates on Variable Elastic Foundation. Symbolic Computation, 1990, Iss. 9, pp. 207–213.

5. Ye Z. Application of Maple V to the nonlinear vibration analysis of circular plate with variable thickness. Computers and Structures, 1999, Iss. 71, pp. 481–488.

6. Pavlovic M. N. Symbolic computation in structural engineering. Computers and Structures, 2003, Iss. 81, pp. 2121–2136.

7. Kirsanov M. N. *Maple i Maplet. Resheniya zadach mekhaniki* [Maple and Maplet. Solving problems of mechanics]. Saint-Petersburg: Lan' Publ., 2012, 512 p. (In Russian)

8. Goloskokov D. P. Postroenie bazisa dlya odnomernykh kraevykh zadach v sistemakh simvol'nykh vychisleniy [Construction of a basis for one-dimensional boundary value problems in symbolic computing systems]. *Prostranstvo, vremya i fundamental'nye vzaimodeystviya* [Space, time and fundamental interactions]. 2017, Iss. 1, pp. 77–87. (In Russian)

9. Kirsanov M. N. *Matematika i programmirovanie v Maple* [Mathematics and programming in Maple]. Moscow: IPR MEDIA Publ., 2020, 164 p. (In Russian)

10. Timoshenko S. P., Voinovsky-Krieger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Moscow: Nauka Publ., 1966. (In Russian)

11. Bubnov I. G. *Trudy po teorii plastin* [Works on the theory of plates]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury Publ., 1955. (In Russian)

12. Goloskokov D. P., Matrosov A. V. Izgib rebristoy plastiny pri slozhnom nagruzhenii [Bending of a ribbed plate under complex loading]. *Vestnik SPbGU. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* [Bulletin of St. Petersburg State University. Applied Mathematics. Computer science. Management processes]. 2021, vol. 17, Iss. 2, pp. 120–130. (In Russian)

13. Goloskokov D. P., Matrosov A. V. Metod nachal'nykh funktsiy v raschete izgiba zashchemlennoy po konturu tonkoy ortotropnoy plastinki [The method of initial functions in the calculation of the bending of a thin orthotropic plate clamped along the contour]. *Vestnik SPbGU. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* [Bulletin of St. Petersburg State University. Applied Mathematics. Computer science. Management processes]. 2021, vol. 17, Iss. 4, pp. 330–344. (In Russian)

14. Goloskokov D. P., Matrosov A. V. Bending of clamped orthotropic thin plates: polynomial solution. Mathematics and Mechanics of Solids, 2022, vol. 27(11), pp. 2498–2509. DOI: 10.1177/10812865221075280.

15. Altsybeev G. O., Goloskokov D. P., Matrosov A. V. Metod superpozitsii v zadache izgiba zashchemlennoy po konturu tonkoy izotropnoy plastinki [Superposition method in the problem of bending a thin isotropic plate clamped along the contour]. *Vestnik SPbGU. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* [Bulletin of St. Petersburg State University. Applied Mathematics. Computer science. Management processes]. 2022, vol. 18, Iss. 3, pp. 347–364. (In Russian)

Received: March 17, 2023
Accepted: April 10, 2023

**Author's information:**

Dmitriy P. GOLOSKOKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; dpg1954@mail.ru
Alexander V. MATROSOV — Dr. Sci. in Physics and Mathematics; Associate Professor; avmatrosov@mail.ru

УДК 331.452

# Перспективные технологии визуализации опасностей

**Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров, Н. И. Иост**

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

**Для цитирования:** *Канонин Ю. Н., Тихомиров О. И., Иост Н. И.* Перспективные технологии визуализации опасностей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 385–395. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-385-395

## Аннотация

**Цель:** Выявить наиболее перспективные технологии визуализации потенциальных опасностей для предупреждения о них работников на производстве, включая железнодорожный транспорт, а также любых лиц в повседневной жизнедеятельности. **Методы:** Поиск и сравнительный анализ информации о новых технологиях визуализации опасностей в различных областях жизнедеятельности на предмет определения возможности и целесообразности их более широкого внедрения. **Результаты:** Произведены обзор и оценка существующих методов и систем предупреждения человека об опасности, включая появившиеся в последние годы технологии, такие как маркерные фонари безопасности (BlueSpot и RedSpot, Red Line и Blue Line), ГОБО-проекторы, Slide-mapping технология, Fogscreen, или аэрозольный (туманный) экран, виртуальная, или цифровая, стена. **Практическая значимость:** Произведенная оценка преимуществ и недостатков тех или иных технологий визуализации опасностей позволит более обоснованно выбирать наиболее перспективные системы для конкретной сферы деятельности и будет способствовать их внедрению на практике.

**Ключевые слова:** Визуализация опасностей и рисков, визуальные сигналы опасности, технологии визуализации опасностей, маркерные фонари безопасности, ГОБО-проекторы, Slide-mapping технология, Fogscreen, или аэрозольный (туманный) экран, виртуальная (цифровая) стена, световая демаркация.

Хорошо всем известно выражение «Предупрежден — значит вооружен». И действительно, очень часто информация о возможном воздействии опасного или вредного производственного фактора спасала человеку жизнь или сохраняла его здоровье. И сегодня, несмотря на внедрение новой, более безопасной техники и совершенных технологий, предупреждение о возможной опасности так же актуально, как и раньше. Тем более, что для этого появляются новые возможности.

С 1 марта 2022 года оценка рисков заставляет работодателя оценивать опасности, возникающие на рабочих местах, вероятность их проявления и тяжесть возможных последствий. Помимо непосредственного использования средств коллективной и индивидуальной защиты, человек должен быть своевременно информирован об угрозе, чтобы вовремя успеть предпринять необходимые действия для защиты от опасного фактора или минимизации такого воздействия.

## Традиционные способы информирования об опасностях

Информацию о возможном появлении опасности человек может получать через различные органы чувств. Например, обоняние позволяет почувствовать наличие в воздухе вредных веществ. Поэтому, например, для обнаружения взрывопожароопасных и токсичных газов, не имеющих выраженного запаха, применяют одо-

ризацию (от лат. *odor* — запах), то есть придание такому газу характерного запаха, легко определяемого с помощью органа обоняния.

Часто задействуют слуховой анализатор. Звуковые сигналы привлекают внимание человека к возникшей или высоковероятной потенциальной опасности. Такие сигналы широко применяются в строительстве, на транспорте, в системе гражданской обороны, для оповещения о нештатных ситуациях работников. Кроме этого, звук помогает идентифицировать опасность по направлению, мощности, скорости приближения. Неслучайно в ЕС и в США требуется установка имитатора шума с уровнем звука не менее 55 дБА для электромобилей, которые практически бесшумны на малых скоростях движения.

Для получения информации об опасности может использоваться тактильный (осязательный) анализатор человека, обеспечивающий ощущения прикосновения, давления, вибрации и щекотки. Чтобы информировать людей о приближении к опасной зоне, иногда используются тактильные покрытия с ощутимым изменением фактуры поверхностного слоя. Тактильные предупреждения обеспечиваются специфическим рельефом поверхности в виде либо выпуклых линий, либо точек. Их используют на железнодорожных платформах, на тротуарах, пешеходных переходах и лестницах для предупреждения людей об опасности, что, в частности, помогает ориентироваться в пространстве людям с нарушениями зрения. Широкое распространение получила дорожная разметка в виде полос, вызывающих легкую вибрацию автомобиля и шум. Они служат для привлечения внимания водителей и информирования об опасности перед перекрестками, пешеходными переходами и другими местами, где нужно снизить скорость.

Но основным каналом поступления информации об опасности, конечно, является зрение. Неслучайно считается, что порядка 90 % всей информации об окружающем мире человек получает посредством зрения.

**Визуальные сигналы опасности**

Согласно ГОСТ Р 57611—2017 (ИСО 11428:1996) [1] визуальный сигнал опасности (*visual danger signal*) — это «сигнал, указывающий на угрозу или фактическое возникновение опасной ситуации, приводящей к риску получения травмы или повреждения оборудования, и требующий принятия мер для устранения опасности, контроля ситуации или других незамедлительных действий. Существует два типа визуальных сигналов опасности: визуальный предупреждающий сигнал и визуальный аварийный сигнал».

Уже много лет на производстве применяются знаки безопасности, цвета сигнальные и сигнальная разметка (ГОСТ 12.4.026—2015) [2], опознавательная окраска трубопроводов и предупреждающих колец (ГОСТ 14202—69) [3], информационные светодиодные табло, маркировка опасных грузов (ГОСТ Р 57479—2017) [4], знаки по непроизводственному травматизму на железной дороге (распоряжение ОАО «РЖД» № 1263 от 4 июня 2013 г. «Об утверждении Руководства по применению единой навигационной системы для вокзалов и остановочных пунктов холдинга РЖД») [5], дорожная система световой индикации в соответствии с ОДМ 218.6.019—2016 «Рекомендации по организации движения и ограждению мест производства дорожных работ» [6], пример которой представлен на рис. 1.

Для визуализации опасностей может применяться фотолюминесцентная обработка поверхностей, обозначающая пути эвакуации, аварийных выходов, мест размещения средств спасения, а также имеющихся опасностей (оборудования, перепадов высот, колонн, выступающих конструкций и многого другого) при отсутствии освещения или в условиях сильного задымления (ГОСТ 12.2.143—2009 [7], ГОСТ 34428—

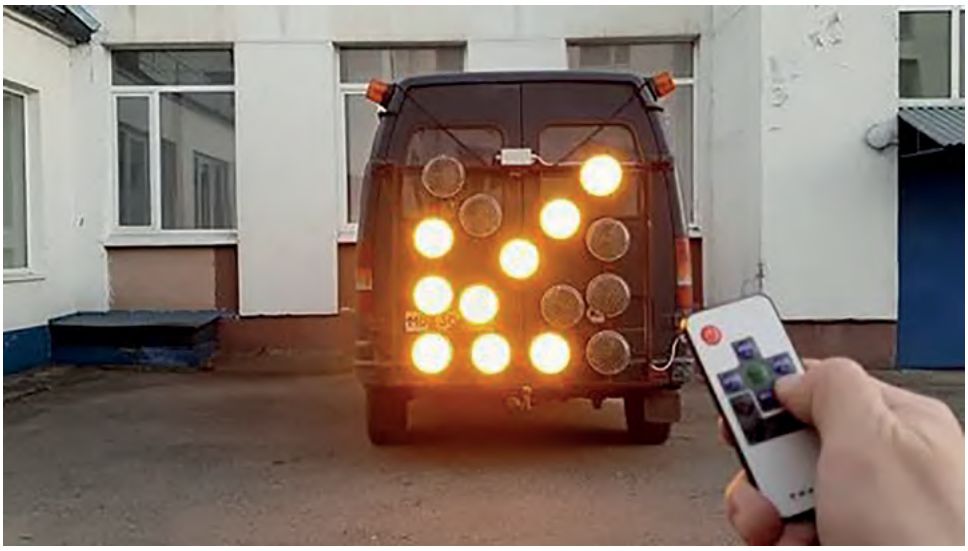


Рис. 1. Пример применения дорожной системы световой индикации на автомобиле

Рис. 2. Примеры фотолюминесцентной эвакуационной системы

2018 [8]). Фотолюминесцентные эвакуационные системы применяются и на объектах транспортной инфраструктуры (железнодорожные тоннели, тоннели метро, станционные сооружения), а также на транспорте, в том числе железнодорожном [9]. При аварийном отключении на объекте искусственного освещения (рабочего и аварийного) в темное время суток или в помещениях, где нет естественного освещения, фотолюминесцентные эвакуационные системы в течение 10 минут очень ярко светятся, предоставляя необходимую информацию для работников по выходу в безопасные места. Этого времени вполне хватает для эвакуации людей из помещений. Долгое и яркое свечение обеспечивается применением фотолюминесцентных материалов, накапливающих световую энергию с последующей ее отдачей в темноте (рис. 2).

Существенным фактором снижения риска травмирования железнодорожников, сотрудников ДПС, врачей скорой помощи являются световозвращающие элементы на одежде. Это позволяет водителям транспортных средств на большом расстоянии заметить человека и предпринять действия по недопущению наезда. Такие же элементы на одежде, световозвращающие брелоки, браслеты и другие элементы (ГОСТ 32074—2013 [10]) позволяют снизить риск травмирования детей на дорогах.

В качестве нового способа визуализации опасностей можно считать организацию наблюдения за работающими в опасных зонах. Согласно ста-

Рис. 3. Маркерные фонари на вилочном погрузчике

тье 214.2 Трудового кодекса РФ [11], работодатель имеет право использовать технические средства для фиксации опасных ситуаций с целью предотвращения травмирования на рабочих местах. Особенностью такого решения является то, что информацию об опасности получает не работник, а сотрудник предприятия, отвечающий за мониторинг безопасности. Машинное зрение, оперативное наблюдение, применение систем видеофиксации позволяют выявить нарушения работником требований безопасности, принять экстренные меры по нормализации ситуации, а также в дельнейшем использовать отснятый видеоматериал в процессе обучения. Внедрение машинного зрения, систем с искусственным интеллектом и автоматических систем управления оборудованием может существенно снизить уровень производственного травматизма на предприятии.

## Перспективные технологии визуализации опасностей

1. *Маркерные фонари безопасности BlueSpot, RedSpot, Red Line, Blue Line* (синяя и красная точки, синяя и красные линии, синяя стрелка)

Такие устройства все чаще стали устанавливать на погрузчиках для повышения безопасности. Эти визуальные предупредительные сигналы формируются с помощью ярких энергосберегающих диодных ламп, которые устанавливаются на крышу кабины погрузчика. Сфокусированный пучок синего или красного света проецируется на пол перед приближающимся погрузчиком, что служит предупреждением для всех работников в дополнение к основному звуковому сигналу (рис. 3).

2. *ГОБО-проекторы* (светодиодное оборудование, которое проецирует статичное изображение на любую поверхность)

Они могут использоваться для выделения опасных зон. Гобо-проекция — это световое изображение, получаемое при прохождении света через трафарет. Термин является аббревиатурой от GOes Before Optics (устанавливается перед оптикой). Трафареты делают из металлических пластин. Гобо-проекторы, в частности, используют для проецирования дорожной разметки «зебра» на пешеходных переходах, которая видна, даже если дорога засыпана снегом [12] (рис. 4).

3. *Slide-mapping*

Эта технология схожа с описанной выше, но намного более «продвинутая». Она была запатентована в России. Изображения нанесены на специальное стекло (слайд), выдерживающее высокие температуры. Картинки от нескольких таких проекторов соединяются в одно большое изобра-

Рис. 4. Гобо-проекция для обеспечения безопасности

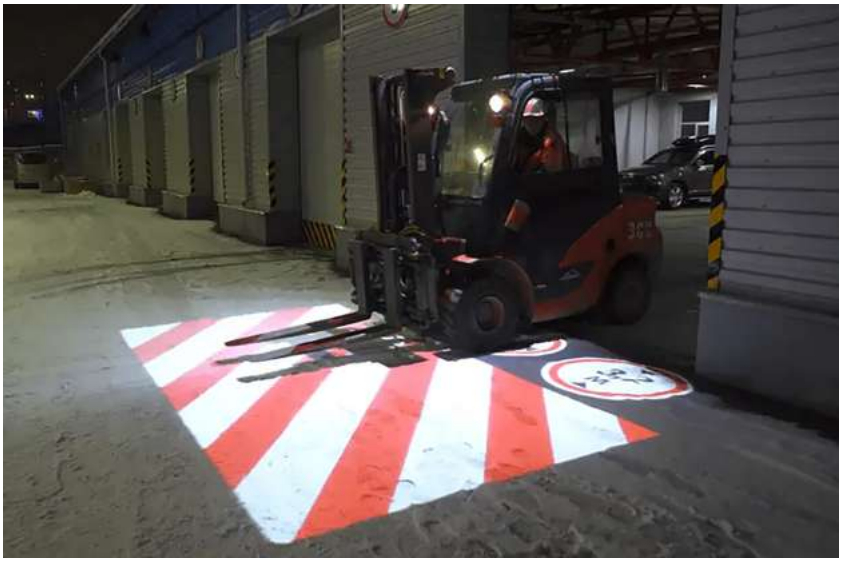


Рис. 5. Пример использования технологии Slide-mapping для обеспечения безопасности при работе вилочного погрузчика

жение. При помощи технологии слайд-мэппинга можно организовать визуализацию опасных зон. Световая демаркация (обозначение границ специальными знаками) хорошо заметна в сумеречное и темное время суток. В нашем случае это осуществляется при помощи технологии слайд-мэппинга. Направленному световому пучку безразлично, закрыта ли поверхность, на которое проецируется изображение снегом, листьями, мусором, или нет. Такая световая демаркация не вызывает ослепление [12] (рис. 5).

Технология Slide-mapping может применяться в помещениях и на улице для разметки, определяющей движения людей и транспорта, знаков безопасности, обозначения границ опасных зон, как статично, так и в движении, например при перемещении опасной зоны при транспортировке груза краном. К плюсам данной технологии можно отнести следующие возможности:

– проецирование на любые поверхности;

– применение при малой освещенности или полном ее отсутствии;

– отображение на объектах, имеющих высокие температуры или находящихся под напряжением;

– создание четкого изображения на поверхностях, постоянно или периодически загрязняемых, покрываемых осадками в виде снега и льда;

– применение на истираемых внутризаводским транспортом поверхностях;

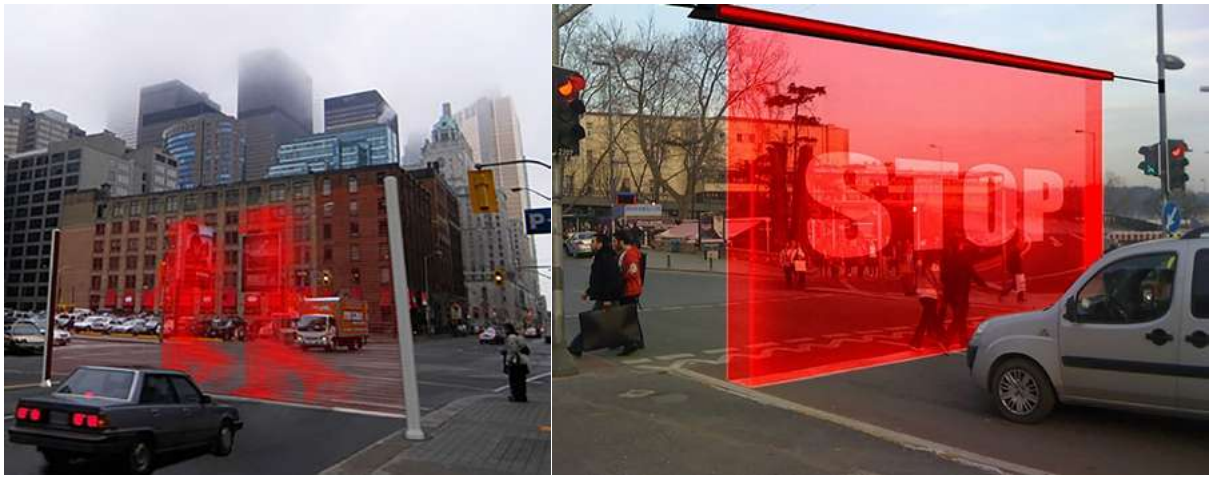



Рис. 6. Виртуальная или цифровая стена, транслирующая голографическое изображение на пешеходном переходе

– быстрая и нетрудоемкая замена проецируемого изображения в зависимости от конкретной ситуации.

Кроме этого, технология Slide-mapping может активировать изображение в нужное время в нужном месте, обозначая опасную зону при перемещении транспорта или груза, а также при пуске оборудования, имеющего движущиеся (подвижные части), являющиеся возможным причинителем травмы.

По аналогии с приоритетом светофора над другими дорожными знаками можно говорить о приоритете сигналов, проецируемых ГОБО-проекторами и Slide-mapping устройствами над статично установленными знаками и сигнальной разметкой.

4. *Fogscreen или аэрозольный (туманный) экран*

Такой подход тоже имеет определенные перспективы для информирования работников об опасностях. Здесь также используется проектор, но в отличие от Slide-mapping технологии проецируемое изображение направляется на переднюю и заднюю поверхность аэрозольного экрана [13]. Это дает возможность наблюдать объемное и динамичное изображение, которое буквально висит в воздухе и через которое можно беспрепятственно пройти. Преимуществом данной технологии является независимость от имеющихся поверхностей. Недостатки тоже очевидны: это возможность применения только при положительных температурах, так как экраном является специальным образом подготовленная и распыленная вода, создающая поверхность из холодного водяного пара. При повышенной скорости движения воздуха в помещении возможно искажение изображения.

5. *Виртуальная или цифровая стена, транслирующая голографическое изображение*

Голографическое изображение представляет собой фотографическую запись светового поля, а не изображения, сформированные линзой (рис. 6). Оно отображает полностью трехмерное изображение голографируемого объекта, которое можно увидеть без помощи специальных очков. Для этого применяется лазерный проектор, проецирующий изображение в зоне перед пешеходным переходом. Проекция представляет собой изображение человека, переходящего улицу, или надпись «Стоп» красного цвета. Они хорошо видны водителям, приближающимся к зоне пешеходного перехода, и заставляют их более ответственно относиться к соблюдению правил дорожного движения.

Такое устройство можно применять и на тех санкционированных переходах через железнодорожные пути, где зафиксировано большое коли-

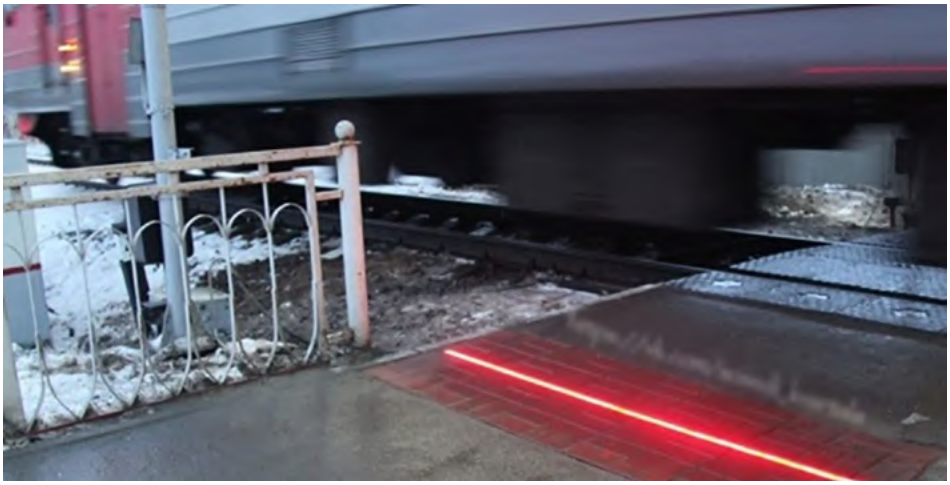


Рис. 7. Светодиодная подсветка, синхронизированная со светофором на переходе через железнодорожные пути в своре улицы Туристской в Санкт-Петербурге

чество жертв. При приближении поезда перед человеком, задумавшимся, спешащим, слушающим в наушниках музыку с опущенным на глаза капюшоном, встает голографическое изображение «пролетающего» состава, которое не может остаться незамеченным. Такой способ предупреждения людей может стать эффективным и эффектным способом спасения человеческих жизней. Установка, например, даже менее эффектной светодиодной полосы (рис. 7) на пешеходном переходе железнодорожных путей в Санкт-Петербурге в створе улицы Туристской (там только в 2017 году погибло 7 человек) привела к полному прекращению случаев наезда подвижного состава на людей в последующие годы [14].

Таким образом, в настоящее время можно говорить о расширении спектра инструментов, которые позволяют визуализировать имеющиеся на различных объектах опасности. Их выбор зависит от целей, уровня риска, технических характеристик технологии и финансовых возможностей организации.

Перспективные технологии визуализации опасностей во многих случаях могут дать более детализированную информацию об источнике опасности и способах защиты от нее. Тем не менее необходимо рассмотреть, выполняются ли требования к оптическим сигналам опасности, приведенным в ГОСТ 51340—99 [15]. Кроме того, необходимо учитывать, имеются ли специальные требования к поверхности проецирования. Очень существенным фактором для выбора технологии визуализации опасности является ее стоимость.

Оценим перспективные технологии визуализации опасностей с учетом экономической целесообразности рассматриваемых устройств. Для наглядности сведем оцениваемые параметры в таблицу.

## Заключение

Результаты выполненного анализа могут помочь производственникам и всем заинтересованным лицам в выборе наиболее перспективных для их условий и видов деятельности технологий визуализации потенциальных опасностей для предупреждения о них работников или других лиц.

Проблемной стороной рассматриваемых устройств можно считать отсутствие полной гарантии выполнения условия о хотя бы пятикратном соотношении яркости сигнала и фона. В результате может не обеспечиваться четкая видимость при некоторых условиях эксплуата-

Оценка новых технологий визуализации на соответствие требованиям к световым сигналам опасности по ГОСТ 51340

| Оцениваемый параметр визуального сигнала | Маркерные фонари безопасности | ГОБО-проекторы | Slide-mapping | Аэрозольный (туманный) экран | Виртуальная или цифровая стена |
|---|---|---|---|---|---|
| Четкая видимость при всех возможных условиях освещенности | Хор. | Удовл. | Удовл. | Удовл. | Удовл. |
| Хорошая различимость от основных световых и других оптических сигналов | Отл. | Отл. | Отл. | Хор. | Отл. |
| Однозначное понимание | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. |
| Подача до наступления опасного события | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. |
| Сигнал четкий и отличается от всех остальных используемых сигналов | Отл. | Отл. | Отл. | Хор. | Отл. |
| Сигнал легко узнаваем | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. |
| Яркость сигнала в случае аварии превышает яркость фона не менее чем в 10 раз, предупреждающего сигнала — не менее чем в 5 раз | Хор. | Удовл. | Удовл. | Удовл. | Удовл. |
| Возможность расположения в поле зрения работника | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. |
| Невозможность ослепляющего действия на работника | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. | Отл. |
| Независимость качества распознавания от помех со стороны окружающей среды, в том числе метеофакторов | Отл. | Отл. | Отл. | Удовл. | Отл. |
| Отсутствие специальных требований к поверхности проецирования | Отл. | Отл. | Отл. | Хор. | Отл. |
| Доступная цена | Отл. | Отл. | Отл. | Удовл. | Неудовл. |

ции, в частности при большой освещенности. Для аэрозольного (туманного) экрана ограничением в применении являются отрицательные температуры, а также высокие скорости движения воздуха. Существенным сдерживающим для широкого применения фактором является высокая стоимость аэрозольного (туманного) экрана, а также виртуальной или цифровой стены.

Но, несмотря на все указанные недостатки, каждая из рассмотренных технологий сможет найти свою нишу в системах обеспечения безопасности.

## Библиографический список

1. ГОСТ Р 57611—2017 (ИСО 11428:1996). Национальный стандарт Российской Федерации. Эргономика. Сигналы опасности визуальные. Общие требования, проектирование и испытания. ОКС 13.180 13.320. Дата введения 2018-12-01.

2. ГОСТ 12.4.026—2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний. Дата введения 2016-06-10.

3. ГОСТ 14202—69. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки. Дата введения 1971-01-01.

4. ГОСТ Р 57479—2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Грузы опасные. Маркировка. Дата введения 2019-11-01.

5. ОАО «Российские железные дороги». Распоряжение от 4 июня 2013 г. № 1263р «Об утверждении руководства

по применению единой навигационной системы для вокзалов и остановочных пунктов холдинга “РЖД”».

6. ОДМ 218.6.019—2016. Отраслевой дорожный методический документ рекомендации по организации движения и ограждению мест производства дорожных работ.

7. ГОСТ Р 12.2.143—2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда Системы фотолюминесцентные эвакуационные Требования и методы контроля. Дата введения 2010-07-01.

8. ГОСТ 34428—2018. Межгосударственный стандарт. Системы эвакуационные фотолюминесцентные. Общие технические условия. Дата введения 2022-05-01.

9. Харитоненко А. Л. Совершенствование нормативно-правовых требований к путям эвакуации / А. Л. Харитоненко, А. Б. Завьялов // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте. Материалы VIII Международной научно-практической конференция. — СПб.: ПГУПС, 2022. — С. 174–178.

10. ГОСТ 32074—2013. Световозвращающие элементы детской и подростковой одежды. Общие технические условия. Дата введения 2015-07-01.

11. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 25 февраля 2022 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 1 марта 2022 г.). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_34683/ (дата обращения: 24.04.2022).

12. Световая визуализация и демаркация для промышленной безопасности предприятий // DMS. Demercation slide mapping. — URL: https://dsmtech.ru/ (дата обращения: 23.04.2023).

13. FOG screen — Туманный экран // Ansilum. — URL: https://ansilum.ru/storegefest/solutions/tumannye-ekrany/fog-screen-tumannyy-ekran (дата обращения: 12.05.2023).

14. Канонин Ю. Н. Предупреждение непроизводственного травматизма в зоне железной дороги / Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров, О. Н. Аниськова // Безопасность жизнедеятельности. — 2022. — № 2(254). — С. 14–18.

15. ГОСТ Р 51340—99. Государственный стандарт Российской Федерации. Безопасность машин. Основные характеристики оптических и звуковых сигналов опасности. Технические требования и методы испытаний. Дата введения 2000-07-01.

Дата поступления: 16.04.2023
Решение о публикации: 02.05.2023

**Контактная информация:**
КАНОНИН Юрий Николаевич — канд. техн. наук, доц.; yu.n.kanonin@yandex.ru
ТИХОМИРОВ Олег Игоревич — канд. техн. наук, доц.; ot-ntb@mail.ru
ИОСТ Наталья Ивановна — студент; pretty.iost@mail.ru

## Prospective Technologies of Hazard Visualization

### Yu. N. Kanonin, O. I. Tikhomirov, N. I. Iost

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

**For citation:** Kanonin Yu. N., Tikhomirov O. I., Iost N. I. Prospective Technologies of Hazard Visualization // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 385–395. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-385-395

**Summary**
**Purpose:** To identify the most prospective technologies for visualizing potential hazards to warn workers in production, including railway transport, as well as any person in everyday life. **Methods:** Search and comparative analysis of information about new technologies for visualizing hazards in various areas of life to determine the possibility and expediency of their wider implementation. **Results:** A review and evaluation of existing methods and systems for alerting individuals to hazards, including technologies that have emerged in

recent years, such as safety marker lights (BlueSpot and RedSpot, Red Line and Blue Line), GOBO projectors, Slide-mapping technology, Fogscreen, or aerosol screens, virtual or digital walls. **Practical significance:** The conducted assessment of the advantages and disadvantages of certain hazard visualization technologies will allow for a more reasonable choice of the most advanced systems for a particular field of activity and will contribute to their implementation in practice.

**Keywords:** Hazard and risk visualization, visual hazard signals, hazard visualization technologies, safety marker lights, GOBO projectors, Slide-mapping technology, Fogscreen or aerosol (fog) screen, virtual (digital) wall, light demarcation.

## References

1. *GOST R 57611—2017 (ISO 11428:1996). Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Ergonomika. Signaly opasnosti vizual'nye. Obshchie trebovaniya, proektirovanie i ispytaniya. OKS 13.180 13.320. Data vvedeniya 2018-12-01* [GOST R 57611—2017 (ISO 11428:1996). National standard of the Russian Federation. Ergonomics. Visual danger signals. General requirements, design and testing. OKS 13.180 13.320. Introduction date 2018-12-01]. (In Russian)

2. *GOST 12.4.026—2015. Mezhgosudarstvennyy standart. Sistema standartov bezopasnosti truda. Tsveta signal'nye, znaki bezopasnosti i razmetka signal'naya. Naznachenie i pravila primeneniya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i kharakteristiki. Metody ispytaniy. Data vvedeniya 2016-06-10* [GOST 12.4.026—2015. Interstate standard. System of labor safety standards. Signal colors, safety signs and signal markings. Purpose and rules of application. General technical requirements and characteristics. Test methods. Introduction date 2016-06-10]. (In Russian)

3. *GOST 14202—69. Mezhgosudarstvennyy standart. Sistema standartov bezopasnosti truda. Opoznavatel'naya okraska, preduprezhdayushchie znaki i markirovochnye shchitki. Data vvedeniya 1971-01-01* [GOST 14202—69. Interstate standard. System of labor safety standards. Identification painting, warning signs and labels. Introduction date 1971-01-01]. (In Russian)

4. *GOST R 57479—2017. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Gruzy opasnye. Markirovka. Data vvedeniya 2019-11-01* [GOST R 57479—2017. National standard of the Russian Federation. Loads are dangerous. Marking. Introduction date 2019-11-01]. (In Russian)

5. *OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi". Rasporyazhenie ot 4 iyunya 2013 g. № 1263r "Ob utverzhdenii rukovodstva po primeneniyu edinoy navigatsionnoy sistemy dlya vokzalov i ostanovochnykh punktov kholdinga "RZhD"* [SC "Russian Railways". Decree № 1263r dated June 4, 2013 "On approval of the guidelines for the use of a unified navigation system for stations and stopping points of the Russian Railways holding"]. (In Russian)

6. *ODM 218.6.019—2016. Otraslevoy dorozhnyy metodicheskiy dokument rekomendatsii po organizatsii dvizheniya i ograzhdeniyu mest proizvodstva dorozhnykh rabot* [ODM 218.6.019—2016. Sectoral road methodological document recommendations on the organization of traffic and fencing of places where road works are carried out]. (In Russian)

7. *GOST R 12.2.143—2009. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Sistema standartov bezopasnosti truda Sistemy fotolyuminestsentnye evakuatsionnye Trebovaniya i metody kontrolya. Data vvedeniya 2010-07-01* [GOST R 12.2.143—2009. National standard of the Russian Federation. Occupational safety standards system Photoluminescent evacuation systems Requirements and methods of control. Date of introduction 2010-07-01]. (In Russian)

8. *GOST 34428—2018. Mezhgosudarstvennyy standart. Sistemy evakuatsionnye fotolyuminestsentnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Data vvedeniya 2022-05-01* [GOST 34428-2018. Interstate standard. Photoluminescent evacuation systems. General specifications. Introduction date 2022-05-01]. (In Russian)

9. Kharitonenko A. L., Zav'yalov A. B. *Sovershenstvovanie normativno-pravovykh trebovaniy k putyam evakuatsii.*

*Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost' na transporte: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsiya* [Improving the legal requirements for evacuation routes. Technospheric and environmental safety in transport: materials of the VIII International Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, pp. 174–178. (In Russian)

10. *GOST 32074—2013. Svetovozvrashchayushchie elementy detskoy i podrostkovoy odezhdy. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Data vvedeniya 2015-07-01* [GOST 32074—2013. Reflective elements of children's and teenage clothing. General specifications. Date of introduction 2015-07-01]. (In Russian)

11. *Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. Trudovoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2001 g. № 197-FZ (red. ot 25 fevralya 2022 g.) (s izm. i dop., vstup. v silu s 1 marta 2022 g.)* [Russian Federation. Laws. Labor Code of the Russian Federation of December 30, 2001 No. 197-FZ (as amended on February 25, 2022) (as amended and supplemented, effective from March 1, 2022)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_34683/ (accessed: April 24, 2023). (In Russian)

12. *Svetovaya vizualizatsiya i demarkatsiya dlya promyshlennoy bezopasnosti predpriyatiy* [Light visualization and demarcation for industrial safety of enterprises]. DMS. Demercation slide mapping. Available at: https://dsmtech.ru/ (accessed: April 24, 2023). (In Russian)

13. *FOG screen — Tumannyy ekran* [FOG screen — Fog screen]. Ansilum. Available at: https://ansilum.ru/storegefest/solutions/tumannye-ekrany/fog-screen-tumannyy-ekran (accessed: April 24, 2023). (In Russian)

14. Kanonin Yu. N., Tikhomirov O. I., Anis'kova O. N. Preduprezhdenie neproizvodstvennogo travmatizma v zone zheleznoy dorogi [Prevention of non-occupational injuries in the area of the railway]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2022, Iss. 2(254), pp. 14–18. (In Russian)

15. *GOST R 51340—99. Gosudarstvennyy standart Rossiyskoy Federatsii. Bezopasnost' mashin. Osnovnye kharakteristiki opticheskikh i zvukovykh signalov opasnosti. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy. Data vvedeniya 2000-07-01* [GOST R 51340—99. State standard of the Russian Federation. Machine safety. The main characteristics of optical and sound danger signals. Technical requirements and test methods. Introduction date 2000-07-01]. (In Russian)

Received: April 16, 2023
Accepted: May 02, 2023

**Author's information:**
Yuriy N. KANONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yu.n.kanonin@yandex.ru
Oleg I. Tikhomirov — PhD in Engineering, Associate Professor; ot-ntb@mail.ru
Natalia I. IOST — Student; pretty.iost@mail.ru

УДК 331.452

# Обеспечение средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы

**Е. Н. Быстров, А. В. Харламова**

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

**Для цитирования:** *Быстров Е. Н., Харламова А. В.* Обеспечение средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 396–403. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-396-403

## Аннотация

**Цель:** Обоснование и разработка инновационного сервисного центра по обеспечению средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы. Анализ зависимости случаев производственного травмирования по причине неприменения средств специальной одежды и специальной защиты и рассмотрение вопросов, связанных с необходимостью создания сервисных центров по хранению, выдаче и чистке средств индивидуальной защиты. **Методы:** Исследование и анализ нормативной документации, регламентирующей применение и обеспечение средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы на примере открытого акционерного общества «Российские железные дороги». Применение результатов статистического метода анализа динамики производственного травматизма по причинам организационно-технического плана. **Результаты:** Предложены к рассмотрению функционалы сервисных центров, а также приведено краткое обоснование их необходимости. Сделаны выводы о перспективности предложенной инновации. **Практическая значимость:** Показано, что создание и внедрение сервисных центров на предприятиях железнодорожного транспорта позволит снизить уровень производственного травматизма, вызванного неприменением средств индивидуальной защиты или применением СИЗ ненадлежащего качества, а также сократить расходы на «досрочное» списание спецодежды за счет качественной чистки и ремонта, что в целом будет способствовать поднятию на новый уровень качества оказываемых услуг работникам предприятий железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** Травматизм, несчастный случай, специальная одежда, специальная обувь, средства индивидуальной защиты, сервисный центр, затраты, производственные факторы.

## Введение

Важнейшими задачами социальной политики государства, в том числе на железнодорожном транспорте, являются охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, снижение числа профессиональных заболеваний и случаев производственного травматизма.

Понятие об обеспечении безопасности работников во время трудового процесса отражено в статье 209 ТК РФ. Одним их способов обеспечения безопасности является бесплатная выдача работникам средств индивидуальной защиты и специальной одежды. В соответствии с Трудовым кодексом средства индивидуальной защиты работников — это специальная одежда, обувь, предназначенные для предотвращения или минимизации воздействия на работников неблагоприятных производственных факторов и предохранения от загрязнений [1].

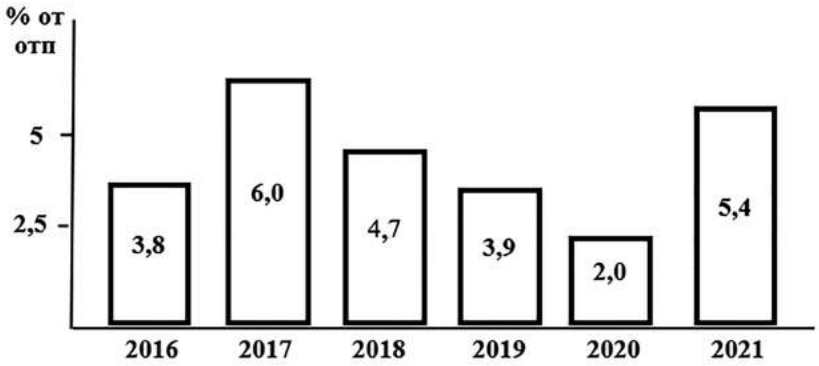



Рис. 1. Соотношение случаев травматизма по причине неприменения средств индивидуальной защиты к причинам травматизма организационно-технического плана

Многими авторами исследовались вопросы производственного травматизма на различных предприятиях Российской Федерации и ближнего зарубежья [2–4]. Отдельные работы были посвящены именно причинам формирования высокого уровня травматизма, и выявлена его зависимость от индивидуальных качеств работающих [5]. Также в трудах [6, 7] были предложены методы и детально рассмотрен экономический механизм снижения травматизма и профзаболеваний в строительной отрасли.

Однако вопросам неприменения средств индивидуальной защиты как фактора возникновения производственного травматизма на предприятиях транспортной отрасли уделялось недостаточное внимание. В связи с чем разработка мероприятий по улучшению сложившейся ситуации является актуальным направлением деятельности.

**Цель работы** состояла в обосновании и разработке инновационного сервисного центра по обеспечению средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы.

## Материалы и методы исследования

В работе проведено исследование и выполнен анализ нормативной документации, регламентирующей применение и обеспечение средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы на примере открытого акционерного общества «Российские железные дороги». Также использовались статистические данные динамики производственного травматизма по причинам организационно-технического плана.

## Результаты исследования и их обсуждение

В открытом акционерном обществе «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») за последние годы прослеживается явная динамика снижения производственного травматизма. Так, в 2016 году было зафиксировано 223 случая, принятых к рассмотрению, а в 2021-м — 126. Основными причинами производственного травматизма являются причины организационно-технологического плана (ОТП), они составляют в среднем 67 %. При рассмотрении динамики неприменения средств индивидуальной защиты (СИЗ) к ОТП за период с 2016 по 2021 год видно, что тенденции к улучшению в данном вопросе не прослеживается (рис. 1). В среднем этот фактор составляет 4,3 % от ОТП.

Такая ситуация просматривается в соотношении неприменения средств защиты к смертельным исходам производственного травмирования и в среднем составляет 3,9 %. В 2016 году неприменение СИЗ составило 1,9 % от смертельных случаев, в 2017 году — 6 %, в 2018 году — 6,7 %,

в 2019 году — 2,2 %, в 2020 году — 1,5 %, в 2021 году — 9 % [8, 9].

Надо отметить, что неприменение средств защиты может подразумевать под собой их отсутствие или их неприменение. Отсутствие средств защиты практически не встречается в линейных предприятиях ОАО «РЖД». В соответствии с приказом Министерства труда и социальной защиты РФ № 766н от 29 октября 2021 г. п. 4 работодатель обязан обеспечить бесплатную выдачу СИЗ, прошедших подтверждение соответствия в установленном законодательством Российской Федерации порядке, работникам для защиты от воздействия вредных и (или) опасных факторов производственной среды и (или) загрязнения, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях. А вот неприменение средств защиты может зависеть от нескольких причин, например, таких как качество средств, несоответствие антропометрическим размерам работника, технологическая пригодность и т. п.

Причина травмирования — неприменение СИЗ — остается актуальной на протяжении длительного периода времени и входит в область первоочередных мер по устранению причин производственного травмирования в ОАО «РЖД» ежегодно. И это несмотря на постоянное увеличение выделяемых денежных средств на закупку средств защиты — с 5200 млн руб. в 2016 году до 12 200 млн руб. в 2021 году. Однако это абсолютный рост финансирования средств защиты, который, вероятно, связан с увеличением закупочной цены средств защиты.

Наряду с вопросами правильного и своевременного обеспечения работников всеми необходимыми средствами индивидуальной защиты следует обратить особое внимание на обеспечение надлежащей эксплуатации, хранение, чистку, качество, а также на организацию выдачи этих средств, что также отражено в приказе Министерства труда и социальной защиты РФ № 766н от 29 октября 2021 г.:

– п. 3: организация всех работ по обеспечению работников СИЗ, в том числе приобретение, выдача, хранение, уход, вывод из эксплуатации, утилизация СИЗ осуществляется за счет средств работодателя;

– п. 11: организовать выдачу СИЗ и (или) их сменных элементов посредством автоматизированных систем выдачи (вендингового оборудования) и дозаторов;

– п. 64: для хранения выданных работникам СИЗ работодатель создает необходимые условия и (или) предоставляет специально оборудованные помещения;

– п. 66: в зависимости от условий эксплуатации СИЗ работодателем в гардеробных или иных специально оборудованных помещениях, используемых для хранения СИЗ, может устанавливаться оборудование для сушки, дегазации, дезактивации, дезинфекции, обезвреживания и обеспыливания СИЗ с целью обеспечения соответствующих условий хранения и возможности последующей эксплуатации СИЗ работниками [10].

В большинстве линейных подразделений ОАО «РЖД» сталкиваются со следующими проблемами:

– недостаток площадей, поэтому хранение спецодежды и спецобуви производится совместно с запасными частями и материалами, что не соответствует установленным нормам хранения в ОАО «РЖД»;

– скопление спецодежды и спецобуви, не подходящей (по спецификации) для работников данного предприятия вследствие текучести кадров;

– невозможность примерки средств индивидуальной защиты работниками при получении из-за отсутствия примерочных кабин;

– несвоевременность химической обработки средств индивидуальной защиты;

*а* *б* *в* *г*

Рис. 2. *а* — помещение промышленной химчистки и прачечной; *б* — специализированный склад хранения и выдачи СИЗ; *в* — помещение для примерки СИЗ; *г* — зал эталонных образцов СИЗ

– несоответствие средств спецодежды и спецзащиты заявленному качеству.

И с такими проблемами сталкиваются не только работники железнодорожного транспорта. Так, по данным Федерации независимых профсоюзов работников, почти 15 % респондентов отметили, что качество и ассортимент СИЗ не отвечают реальным условиям труда. Только половина опрошенных довольны зафиксированными сроками носки СИЗ. 60 % респондентов считают, что необходимо вносить изменения в действующие нормативно-правовые акты, потому что сроки носки и ассортимент СИЗ неактуальны. По мнению опрошенных, необходимо отменить ограничения на замену ассортимента и отнесение к затратам, включенным в себестоимость производимой продукции, сверхнормативной выдачи СИЗ, если это поддержано оценками риска, решениями трудового коллектива и профсоюзом [11].

В целях исправления сложившейся ситуации и эффективной организации обеспечения работников ОАО «РЖД» специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты, осуществления контроля за их качеством, хранением и уходом возникает необходимость рассмотреть возможность организации специализированного сервис-центра спецодежды и спецобуви (далее С-Ц СИЗ), который может содержать следующие функционалы (рис. 2):

– промышленную химчистку и прачечную, цех по ремонту спецодежды;

– помещения для хранения спецодежды, спецобуви и средств индивидуальной защиты;

– помещение для подборки спецодежды, спецобуви с примерочной кабиной;

– выставочный зал эталонных образцов выдаваемой спецодежды и спецобуви;

– зал для проведения семинаров и технической учебы по охране труда;

– зал «История железнодорожного обмундирования».

Сервис-центры СИЗ могут располагаться централизовано под эгидой главных материальных складов отдельной железной дороги или на территории крупных узловых станций, где обычно располагаются основные линейные «потребители» средств защиты, такие как: ПЧ, ШЧ, ТЧ, ВЧД, НГЧ, ЭЧ и другие. Можно сказать, что наиболее эффективно расположение небольших С-Ц СИЗ на самих предприятиях. Но, учитывая структурную организацию в пределах железной дороги, это мало вероятно.

Задачи комплекса должны вытекать из вышеперечисленного функционала центра.

На многих предприятиях железных дорог, в том числе и на Октябрьской ЖД отсутствует процесс очистки (химической, термической, пылевой). Это не только противоречит нормам по охране труда ОАО «РЖД», но и приводит к тому, что 30 % спецодежды списывается раньше установленных сроков носки, а это прямые экономические убытки.

Сервис-центр необходимо оборудовать помещениями для стирки и химчистки спецодежды и в случаях потребности помещениями и установками для дегазации, дезактивации и обезвреживания спецодежды, спецобуви и других средств индивидуальной защиты.

Все помещения С-Ц СИЗ должны быть сухими, отапливаемыми, с естественной вентиляцией, обеспечивающей однократный воздухообмен в час, обеспечивая наиболее комфортные микроклиматические параметры для хранения СИЗ и нахождения в них работников. В настоящее время на ряде предприятий под средства защиты отданы абсолютно непригодные помещения даже для хранения новых и отработанных спецодежды и обуви, которые ждут своей очереди на очистку или утилизации.

Спецодежда, спецобувь и другие средства индивидуальной защиты размещаются на полках-стеллажах по видам и назначению.

Приемка каждой партии, поступившей на С-Ц СИЗ спецодежды, спецобуви и других средств индивидуальной защиты, должна производиться комиссией предприятия по контролю качества средств индивидуальной защиты, утверждаемой совместным решением руководителей предприятия и профсоюзного комитета.

Для подбора средств индивидуальной защиты работниками необходимое их количество должно размещаться в специализированных помещениях для подборки спецодежды.

После подборки спецодежды работники примерят ее в примерочных кабинах.

В течение небольшого промежутка времени каждый работник может индивидуально подобрать удобно сидящий размер спецодежды и спецобуви.

Теплые спецодежда и спецобувь будут выдаваться работникам с наступлением холодного времени года, а с наступлением теплого времени года будут приняты комплексом для организованного хранения до следующего года.

Для каждого структурного подразделения ОАО «РЖД» всегда актуально проведение обучающих семинаров и технической учебы по охране труда, и перед руководителями зачастую встает вопрос выбора места для их организации. Новый комплекс будет включать в себя зал для проведения семинаров и технической учебы по охране труда. Для этих целей в дополнение к проектируемым помещениям может быть добавлен зал «технической учебы».

Также в зале производители средств спецодежды и спецзащиты будут устраивать презентации прогрессивных новшеств, используемых в их продукции.

## Выводы

Создание специализированного сервис-центра спецодежды и спецобуви позволит:

– снизить уровень производственного травматизма, вызванного неприменением средств индивидуальной защиты или применением СИЗ ненадлежащего качества;

– сократить расходы на «досрочное» списание спецодежды за счет качественной чистки и ремонта;

– снизить неликвидные остатки спецодежды и спецобуви на предприятиях железнодорожного транспорта;

– высвободить производственные помещения на предприятиях железнодорожного транспорта.

## Библиографический список

1. Трудовой Кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 22.11.2021): федер. закон: [принят Государственной Думой 21 декабря 2001 г.]. — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/78f36e7afa535cf23e1e865a0f38cd3d230eecf0.

2. Шанина Е. В. Анализ производственного травматизма на одном из предприятий города Красноярска / Е. В. Шанина, Ек. В. Шанина // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2-22. — С. 4893–4896.

3. Пушенко С. Л. Анализ производственного травматизма в строительной индустрии и пути его снижения / С. Л. Пушенко, В. Л. Гапонов, В. А. Кукареко // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 2. — С. 24–30.

4. Сарсенбекова М. Анализ производственного травматизма в энергетике / М. Сарсенбекова // Материалы Международной научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения — 15: Молодежь, наука, технологии — новые идеи и перспективы», приуроченной к 125-летию С. Сейфуллина. — 2019. — Т. II, Ч. 1. — С. 240–243.

5. Савенко С. К. Зависимость уровня травматизма от индивидуальных качеств работающих / С. К. Савенко, И. Т. Бабич // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 4. — С. 22–23.

6. Кузьмина О. В. Снижение уровня производственного травматизма в исследуемой организации / О. В. Кузьмина, А. К. Искакова // Молодой ученый. — 2016. — № 26(130). — С. 55–58.

7. Феоктистова О. Г. Экономический механизм снижения травматизма и профзаболеваний в строительной отрасли / О. Г. Феоктистова, Е. Г. Костюченко // Вестник Алтайской академии экономики и права. — 2019. — № 3. — С. 121–128.

8. Условия труда в ОАО «РЖД». — URL: https://social.rzd.ru/.

9. Условия труда. — URL: https://www.gks.ru/working_conditions.

10. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 29 октября 2021 г. № 766н «Об утверждении Правил обеспечения работников средствами индивидуальной защиты и смывающими средствами». — URL: https://publication.pravo.gov.ru.

11. Федерация независимых профсоюзов работников ФНПР. — URL: https://fnpr.industrialconflicts.ru.

Дата поступления: 17.01.2023
Решение о публикации: 26.02.2023

**Контактная информация:**
БЫСТРОВ Евгений Николаевич — ст. преподаватель; evgenijbystrov@mail.ru
ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна — канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru

# Provision of Personal Protective Equipment for Employees of Transport Enterprises

**E. N. Bystrov, A. V. Kharlamova**

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

**For citation:** Bystrov E. N., Kharlamova A. V. Provision of Personal Protective Equipment for Employees of Transport Enterprises // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 396–403. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-396-403

## Summary

**Purpose:** Substantiation and development of an innovative service center for providing personal protective equipment for employees of transport enterprises. Analysis of the correlation of cases of occupational injury due to the non-use of special clothing and special protection and consideration of issues related to the need to create service centers for the storage, issuance, and cleaning of personal protective equipment. **Methods:** Research and analysis of regulatory documentation regulating the use and provision of personal protective equipment for employees of transport enterprises on the example of the Open Joint Stock Company "Russian Railways". Application of the results of the statistical method of analyzing the dynamics of occupational injuries for organizational and technical reasons. **Results:** The functionality of service centers is proposed for consideration, as well as a brief justification of their necessity. Conclusions about the prospects of the proposed innovation are drawn. **Practical significance:** It is shown that the creation and implementation of service centers at railway transport enterprises will reduce the level of occupational injuries caused by the non-use of personal and collective protective equipment or the use of PPE of inadequate quality, as well as reduce the cost of premature disposal of workwear due to high-quality cleaning and repair, which in general will contribute to raising the quality of services rendered to employees of railway transport enterprises to a new level.

**Keywords:** Injury, accident, special clothing, special shoes, personal protective equipment, service center, costs, production factors.

## Reference

1. *Trudovoy Kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2001 g. № 197-F3 (red. ot 22.11.2021): feder. zakon: [prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 21 dekabrya 2001 g.].* [Labor Code of the Russian Federation dated December 30, 2001 № 197-F3 (as amended on November 22, 2021): feder. law: [adopted by the State Duma on December 21, 2001]]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/78f36e7afa535cf23e1e865a0f38cd3d230eecf0. (In Russian)

2. Shanina E. V., Shanina Ek. V. Analiz proizvodstvennogo travmatizma na odnom iz predpriyatiy goroda Krasnoyarska [Analysis of industrial injuries at one of the enterprises of the city of Krasnoyarsk]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2015, Iss. 2-22, pp. 4893–4896. (In Russian)

3. Pushenko S. L., GaponovV. L., Kukareko V. A. Analiz proizvodstvennogo travmatizma v stroitel'noy industrii i puti ego snizheniya [Analysis of industrial injuries in the construction industry and ways to reduce it]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh system* [Safety of technogenic and natural systems]. 2022, Iss. 2, pp. 24–30. (In Russian)

4. Sarsenbekova M. Analiz proizvodstvennogo travmatizma v energetike [Analysis of occupational injuries in the

energy sector]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii "Seyfullinskie chteniya — 15: Molodezh', nauka, tekhnologii — novye idei i perspektivy", priurochennoy k 125-letiyu S. Seyfullina* [Proceedings of the International Scientific and Theoretical Conference "Seifullin Readings — 15: Youth, Science, Technology — New Ideas and Prospects", dedicated to the 125th anniversary of S. Seifullin]. 2019, vol. II, part 1, pp. 240–243. (In Russian)

5. Savenko C. K., Babich I. T. Zavisimost' urovnya travmatizma ot individual'nykh kachestv rabotayushchikh [Dependence of the level of injuries on the individual qualities of workers]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry]. 2017, Iss. 4, pp. 22–23. (In Russian)

6. Kuz'mina O. V., Iskakova A. K. Snizhenie urovnya proizvodstvennogo travmatizma v issleduemoy organizatsii [Reducing the level of industrial injuries in the organization under study]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2016, Iss. 26(130), pp. 55–58. (In Russian)

7. Feoktistova O. G., Kostyuchenko E. G. Ekonomicheskiy mekhanizm snizheniya travmatizma i profzabolevaniy v stroitel'noy otrasli [Economic mechanism for reducing injuries and occupational diseases in the construction industry]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]. 2019, Iss. 3, pp. 121–128.

8. *Usloviya truda v OAO "RZhD"* [Working conditions in Russian Railways]. Available at: https://social.rzd.ru/. (In Russian)

9. *Usloviya truda* [Working conditions]. URL: https://www.gks.ru/working_conditions. (In Russian)

10. *Prikaz Ministerstva truda i sotsial'noy zashchity RF ot 29 oktyabrya 2021 g. № 766n "Ob utverzhdenii Pravil obespecheniya rabotnikov sredstvami individual'noy zashchity i smyvayushchimi sredstvami"* [Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation of October 29, 2021 № 766n "On Approval of the Rules for Providing Workers with Personal Protective Equipment and Washing Agents"]. Available at: https://publication.pravo.gov.ru. (In Russian)

11. *Federatsiya nezavisimykh profsoyuzov rabotnikov FNPR* [Federation of Independent Trade Unions of FNPR Workers]. Available at: https://fnpr.industrialconflicts.ru. (In Russian)

Received: January 17, 2023
Accepted: February 26, 2023

**Author's information:**
Evgeny N. BYSTROV — Senior Lecturer; evgenijbystrov@mail.ru
Alina V. KHARLAMOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; alavina@yandex.ru

УДК 504.064.2

# Анализ и оценка качества поверхностных вод Приозерского района Ленинградской области

**А. В. Харламова, П. А. Белова**

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

**Для цитирования:** *Харламова А. В., Белова П. А.* Анализ и оценка качества поверхностных вод Приозерского района Ленинградской области // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 404–413. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-404-413

## Аннотация

**Цель:** Изучение показателей качества воды поверхностных водных объектов Приозерского района Ленинградской области с помощью лабораторных исследований, а также оценка экологического состояния водных источников по различным интегральным характеристикам загрязненности поверхностных вод. Определить показатели качества поверхностных вод культурно-бытового назначения в лабораторных условиях. Оценить экологическое состояние загрязненного водоема по расчетным интегральным показателям: индекса загрязненности водоема, индекса оценки трофического состояния и удельного комбинаторного индекса загрязненности поверхностных вод. Рассмотреть возможные варианты улучшения экологической ситуации исследуемых водных объектов. **Методы:** Отбор проб воды из пяти водных объектов Приозерского района Ленинградской области для дальнейших лабораторных исследований. Анализ отобранных проб из водных источников для определения состава поверхностных вод на наличие загрязняющих веществ и параметров качества воды с помощью стандартизированных методик. Сопоставление полученных результатов с нормами предельно допустимых концентраций для заданных показателей. **Результаты:** Установлено, что в трех из пяти исследованных водных объектах обнаруживаются превышения нормативных значений по нескольким показателям. Выбран один из загрязненных водных источников — река Вуокса — для дальнейшего расчета интегральных показателей качества поверхностных вод. Дана оценка экологического состояния данного водного объекта по трем расчетным индексам. Предложены мероприятия по улучшению экологической обстановки водных объектов региона. **Практическая значимость:** Показано, что недостаточно исследованные водные объекты Приозерского района Ленинградской области в целом удовлетворяют нормативам качества поверхностных вод, однако некоторые объекты все-таки относятся к категории умеренно загрязненных, что требует дальнейшего более углубленного изучения их состояния с целью предотвращения увеличения загрязнения.

**Ключевые слова:** Водный объект, поверхностные воды, загрязнение, гидрохимический показатель, интегральный показатель качества, индекс загрязнения водного объекта, удельный комбинаторный индекс загрязнения, индекс трофического состояния, класс качества воды.

## Введение

Загрязнение поверхностных вод биосферы относится к глобальным экологическим проблемам. В настоящий момент наблюдается интенсификация промышленного производства, приводящая к увеличению темпов загрязнения водных объектов, а также изъятию значительных объемов пресной воды из окружающей природной среды.

Уже сегодня дефицит питьевой воды прослеживается у 40 % населения планеты. Потребление воды на одного человека в сутки может колебаться от 5 до 800 литров. Кроме того, в

водные источники, используемые для питьевого и культурно-бытового назначений, происходит сброс неочищенных сточных вод от объектов различных отраслей промышленности, а также осуществляется сплав коммунальной канализации.

По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, к вододефицитным регионам относятся: республики Крым, Калмыкия, Ингушетия, Белгородская, Курганская и Курская области [1]. Субъектами Российской Федерации, в которых присутствует загрязнение пресной воды, культурно-бытового назначения, являются: Белгородская, Калининградская, Новгородская, Мурманская области, Кольский полуостров [1].

Ленинградская область не относится к регионам, в которых прослеживается дефицит водных ресурсов. Но тем не менее важно рационально использовать имеющийся потенциал, так как данный регион занимает второе место по общему забору воды среди субъектов Российской Федерации и первое место по объему использования свежей воды [1].

На территории области расположено самое крупное пресноводное озеро Европы — Ладожское озеро. В конце двадцатого века был закрыт Приозерский целлюлозно-бумажный комбинат (ЦБК), стоки которого попадали в Ладожское озеро из близлежащих заливов. Негативное влияние комбината пагубно сказалось на здоровье населения, повысилась смертность, в том числе детская. Влияние неочищенных отходов ЦБК, накопленных в заливе Темном, и в настоящее время распространяется до водозабора г. Приозерска и может оказывать негативный эффект на здоровье населения [2]. Ввиду этого необходимо обеспечивать постоянным наблюдением состояние озеро-речных систем, так как загрязнение одного водного объекта незамедлительно приводит к загрязнению прочих.

**Актуальность**

Исследованию вопросов экологического состояния водных ресурсов Ленинградской области посвящено большое количество работ. Так, в работах [3, 4] определена динамика состояния бактериопланктона Щучьего залива Ладожского озера после закрытия Приозерского ЦБК, а также была дана экологическая оценка качества вод литоральной зоны Ладожского озера по результатам микробиологических исследований. Было изучено состояние поверхностных вод Ленинградской области [5]. Основной интерес для исследователей представляло именно Ладожское озеро, так как оно является важным стратегическим водным объектом. Кроме того, в Ладожское озеро впадает 35 крупных притоков — рек, а в целом в бассейне Ладожского озера расположено более 50 тысяч озер и 3500 рек с длиной русла более 10 км. То есть по состоянию Ладожского озера можно понять, на каком экологическом уровне находятся реки и близлежащие к нему озера [5].

К тому же без внимания не осталась река Вуокса. Многими авторами были отмечены превышения нормативов по большинству химических показателей качества воды, таких как pH, БПК, железо, медь, цинк [6–10]. Однако в данных научных работах при анализе состояния водных объектов учитывался только один источник, на основании чего впоследствии делались выводы относительно всего региона.

Комплексных оценок по районам не проводилось. Без внимания осталось большинство водных объектов. Поэтому в данной научной работе был выполнен анализ показателей качества и дана оценка экологическому состоянию поверхностных вод Приозерского района Ленинградской области.

**Цель работы** состояла в изучении показателей качества воды поверхностных водных объектов Приозерского района Ленинградской

Объекты лабораторных анализов:
*1* — озеро Ладожское; *2* — озеро Вуокса; *3* — река Вуокса;
*4* — озеро Снетковское; *5* — озеро Воробьево

области с помощью лабораторных исследований, а также оценке экологического состояния водных источников по различным интегральным характеристикам загрязненности поверхностных вод.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Определить показатели качества поверхностных вод культурно-бытового назначения в лабораторных условиях.

2. Оценить экологическое состояние загрязненного водоема по расчетным интегральным показателям: индекса загрязненности водоема, индекса оценки трофического состояния и удельного комбинаторного индекса загрязненности поверхностных вод.

## Объект исследования

Для исследований был выбран Приозерский район Ленинградской области, так как на его территории находится большое количество водных объектов. Для лабораторных анализов были выбраны: Ладожское озеро, озеро Вуокса, Снетковское озеро, Воробьево озеро и река Вуокса (рисунок).

Водные ресурсы Приозерского района используются для деревообрабатывающей промышленности и хозяйственных нужд. Река Нева, образующая с Ладожским озером озеро-речную систему, обеспечивает водой город федерального значения — Санкт-Петербург.

## Методы исследований

Отбор проб для дальнейших лабораторных исследований был выполнен в соответствии с действующими государственными стандартами и осуществлялся осенью 2022 г. Для гидрохимического анализа вода была отобрана у берегов реки Вуоксы, на расстоянии 30–40 см выше дна. С целью изучения состава вод озер пробы отбирались на удалении от берега, на расстоянии 50 см от поверхности [11].

ТАБЛИЦА 1. Результаты гидрохимического лабораторного анализа поверхностных вод Приозерского района Ленинградской области

| Наименование параметра | Ладожское озеро | Вуокса река | Вуокса озеро | Снетковское озеро | Воробьево озеро | ПДК |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Цветность (градус цветности) | 38 | 46 | 29 | 12 | 14 | 20 |
| Мутность, мг/дм$^3$ | 0,63 | 0,81 | < 0,58 | < 0,58 | < 0,58 | 2 |
| pH (водородный показатель) | 6,7 | 6,4 | 6,5 | 6,4 | 6,6 | 6,5–8,5 |
| Окисляемость, мг/дм$^3$ | 6,9 | 9,6 | 6,8 | 6,1 | 3,7 | 5 |
| Железо общее, мг/дм$^3$ | 0,31 | 0,65 | 0,46 | < 0,1 | 0,18 | 0,3 |
| Нитриты, мг/дм$^3$ | 0,019 | 0,03 | 0,02 | < 0,02 | 0,02 | 3 |
| Нитраты, мг/дм$^3$ | 0,8 | –0,2 | 0,9 | –0,4 | –0,4 | 45 |
| Аммиак, мг/дм$^3$ | 0,15 | 1,26 | 0,3 | < 0,05 | < 0,05 | 2 |
| Хлориды, мг/дм$^3$ | 5,2 | 10,8 | 10,2 | 6,1 | 1,7 | 350 |
| Сульфаты, мг/дм$^3$ | 13,4 | 13,8 | 14,6 | 8 | 7,5 | 500 |
| Жесткость (градус жесткости) | 1,4 | 2,2 | 1,4 | 1,2 | 0,8 | 7 |
| Растворенный кислород, мг/дм$^3$ | — | 10,4 | — | — | — | > 4 |
| БПК$_5$, мгО$_2$/дм$^3$ | — | < 1 | — | — | — | < 4 |

ТАБЛИЦА 2. Оценка экологического состояния вод реки Вуоксы по различным интегральным показателям

| Интегральные показатели | Значение | Оценка экологического состояния |
|---|---|---|
| ИЗВ | 1,64 | Вода умеренно загрязненная, 3 класс качества воды |
| УКИЗВ | 0,7 | Вода слабозагрязненная, 2 класс качества воды |
| ИТС | 7,56 | Мезотрофный трофический класс водоема, умеренный уровень биологической продуктивности, «удовлетворительное» качество воды |

При анализе отобранных проб из водных источников Приозерского района был определен состав поверхностных вод на наличие загрязняющих веществ и параметров качества воды с помощью стандартизированных методик [12–21]. Нормы предельно допустимых концентраций (ПДК) для заданных показателей были взяты из СанПин 1.2.3684—21 и СанПин 1.2.3685—21 [22, 23].

Основные результаты гидрохимического лабораторного анализа показателей качества поверхностных вод исследованных водных объектов Приозерского района представлены в табл. 1. Как видно, в трех водных источниках присутствуют превышения по параметру «окисляемость». Окисляемость — это показатель, который характеризует присутствие в воде минеральных и органических веществ. Источниками окисляемости являются как природные, так и техногенные факторы. Органические вещества в чистом виде не представляют угрозы для здоровья и жизни человека, но они крайне вредны при взаимодействии с железом и марганцем, негативно влияющими на пищеварительную и эндокринную системы человека.

Также обнаруживаются превышения по содержанию железа в Ладожском озере, реке Вуоксе и озере Вуокса. Железо попадает в воду естественным путем или из-за антропогенного воздействия, например стоки предприятий или наличие старых водопроводных труб. Вода, у которой повышенное содержание железа, обладает металлическим привкусом и запахом, приобретает бурую окраску. Железо, растворенное в воде, не усваивается организмом. Оно увеличивает нагрузку на процесс пищеварения и работу почек. Избыток железа в водных источниках может поражать

слизистые, приводить к аллергическим реакциям со стороны организма.

Цветность воды характеризует окраску воды. Водные источники Ленинградской области располагаются в зоне торфяников, чье влияние ведет к появлению желтоватого цвета. Также цветность зависит от количества в воде железа и органических соединений.

Остальные параметры находятся в пределах допустимых значений для данных показателей. Таким образом, воды озер Снетковское и Воробьево полностью удовлетворяют нормативам по гидрохимическому составу и в дальнейших исследованиях не участвовали.

Особое внимание было уделено реке Вуоксе, так как она является связующим звеном между двумя озерами — Ладожским и озером Вуокса, где некоторые показатели не соответствовали нормативным значениям. Это может быть вызвано тем, что в данный водный объект происходит сток неочищенных вод с завода и общесплавной канализации.

По полученным результатам лабораторных исследований была дана оценка экологического состояния реки Вуоксы. В качестве интегральной характеристики загрязненности вод реки Вуоксы использовались классы качества воды, оцениваемые по величинам «индекса загрязненности воды» (ИЗВ), а также система оценки качества поверхностных вод — «удельный комбинаторный индекс загрязненности воды» (УКИЗВ). Кроме того, был рассчитан индекс оценки трофического состояния (ИТС) водоема [24]. Полученные расчетные значения представлены в табл. 2.

Индекс загрязненности водоема рассчитывался по шести показателям, два из которых растворенный кислород и $БПК_5$, остальные четыре показателя могут быть любыми, но они должны превышать норму ПДК. Для расчета индекса были взяты такие параметры: растворенный кислород, $БПК_5$, окисляемость, железо, цветность, аммиак.

В расчете УКИЗВ участвовали: повторяемость случаев загрязненности (частота обнаружения концентраций, превышающих ПДК), среднее значение кратности превышения ПДК (среднее значение результатов анализа проб, которые превышали ПДК, без учета проб, не превышавших ПДК). По каждому из этих показателей определялись частные оценочные баллы ($S\alpha$ и $S\beta$) — условные величины. Произведение оценочных баллов является обобщенным оценочным баллом ($S$). Сумма обобщенных оценочных баллов по всем показателям является комбинаторным индексом загрязненности воды (КИЗВ). УКИЗВ вычисляется как отношение КИЗВ к количеству показателей, участвовавших в его оценке. Расчетное значение указывает на то, что по данному индексу оценивания воды реки Вуоксы относятся к слабо загрязненным и соответствуют 2 классу качества.

Полученные результаты свидетельствует о том, что река Вуокса умеренно загрязненная, соответствует 3 классу качества вод. Такие результаты находятся в соответствии с данными, представленными в отчете об экологической ситуации в Ленинградской области в 2021 году и по другим водным объектам региона [25].

Индекс трофического состояния — это система классификации, разработанная для оценки водных объектов на основе величины биологической продуктивности, которую они поддерживают. Индекс трофического состояния водоема рассчитывается по значениям pH и растворенного кислорода [24].

Данный индекс показывает, что река Вуокса соответствует мезотрофному трофическому классу водоема, имеет умеренный уровень биологической продуктивности, «удовлетворительное» качество воды.

После изучения полученных результатов необходимо понять, какие факторы являются источниками загрязнения. На примере данных водных объектов можно выделить деревообрабатывающее предприятие на берегу Ладожского озера и

утечку неочищенных коммунальных стоков в реку Вуоксу.

Анализ существующих методов устранения выявленных загрязнений, с целью улучшения экологического состояния загрязненных водных объектов, позволил выделить следующие организационно-технические мероприятия [26]:

– изменение технологических процессов в сторону ресурсосберегающих, малоотходных;

– канализование населенных пунктов;

– санитарная очистка водного объекта;

– повторное использование сточных вод;

– очистка сточных вод.

Однако существующие методы санитарной очистки загрязненных водных объектов являются очень дорогостоящими и практически не применяются для озер с большой площадью водной поверхности. Кроме того, использование данных методов не дает должного эффекта снижения антропогенной нагрузки, ведь они борются только с последствием, а не с источником загрязнений.

Таким образом, в данном случае стоит сделать упор на проведение более качественной очистки сточных вод перед сбросом в водный объект, а также герметизацию канализационных систем населенных пунктов Приозерского района Ленинградской области.

## Выводы

1. Водные объекты Приозерского района Ленинградской области, которые расположены вдали от городов, поселков, посреди леса (озера Снетковское и Воробьево), имеют более благоприятную экологическую обстановку, чем те, которые располагаются близ населенных пунктов.

2. Исследования показали, что 3 водных объекта из 5 имеют превышения по различным показателям качества вод. Среди этих параметров находится окисляемость воды, что может негативно влиять на эндокринную систему человека. Превышение в показателе цветности свидетельствует о том, что вода имеет желтоватый оттенок, повышенный уровень железа в воде может повлечь аллергические реакции. Таким образом, она не пригодна к использованию в питьевых целях.

3. Проведенные расчеты индекса загрязненности водоема, индекса оценки трофического состояния, удельного комбинаторного индекса загрязненности показали, что река Вуокса по своему экологическому состоянию относится к умеренно загрязненным водным объектам со средним уровнем биологической продуктивности. Таким образом, есть необходимость более углубленного изучения состояния данного водного объекта с разработкой мероприятий по предотвращению увеличения его загрязнения.

4. Приоритетными методами по улучшению экологического состояния водных объектов Приозерского района Ленинградской области следует считать повышение качества очистки сточных вод предприятий и коммунальной сферы, а также герметизацию канализационных систем населенных пунктов региона с целью предотвращения утечки фекальных стоков.

## Библиографический список

1. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2016 году». — М.: НИА-Природа, 2017. — 300 с.

2. Сунцова Е. Б. Комплексная оценка экологического состояния природных объектов после закрытия предприятий целлюлозно-бумажной промышленности: диссертация / Е. Б. Сунцова. — СПб., 2003. — 183 с.

3. Митрукова Г. Г. Динамика состояния бактериопланктона Щучьего залива Ладожского озера после закрытия Приозерского ЦБК / Г. Г. Митрукова, Л. Л. Капустин, Е. А. Курашов // Вода и экология: проблемы и решения. — СПб., 2021. — № 3(87). — С. 66–74.

4. Митрукова Г. Г. Экологическая оценка качества вод литоральной зоны Ладожского озера по результатам микробиологических исследований / Г. Г. Митрукова, Л. Л. Капустин, Е. А. Курашов // Гидробиология. — СПб., 2020. — С. 88–100.

5. Крылова Ю. В. Оценка экологического состояния литоральной зоны Ладожского озера по результатам исследований 2019 года / Ю. В. Крылова, Е. А. Курашов, А. М. Пономаренко // Труды Карельского научного центра РАН. — СПб., 2022. — № 6. С. 102–120.

6. ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Качество вод поверхностных водных объектов в декабре 2020 г. — СПб., 2021.

7. Ахтямов Р. Г. Оценка и пути уменьшения экологической опасности объектов автотранспортной инфраструктуры урбанизированной территории: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. Г. Ахтямов. — Казань: Казанский государственный технологический университет, 2009. — 19 с.

8. Ахтямов Р. Г. Разработка методики выявления потенциально опасных объектов / Р. Г. Ахтямов, Н. С. Сенюшкин, А. В. Суханов // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2011. — Т. 7. — № 5. — С. 192–197.

9. Ахтямов Р. Г. Подходы к оценке критического срока эксплуатации технологического оборудования на опасных производственных объектах / Р. Г. Ахтямов, А. Н. Елизарьев, Н. С. Сенюшкин и др. // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 5. — С. 122.

10. Елизарьев А. Н. Современные технологии защиты объектов транспортной инфраструктуры на основе моделирования опасных ситуаций / А. Н. Елизарьев, Р. Г. Ахтямов, С. Г. Аксенов и др. // Безопасность жизнедеятельности. — 2018. — № 10(214). — С. 23–28.

11. ГОСТ Р 59024—2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Вода. Общие требования к отбору проб.

12. ГОСТ Р 55684—2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости.

13. ГОСТ 4011—72. Межгосударственный стандарт. Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа.

14. ГОСТ Р 57164—2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности.

15. ГОСТ 23268.8—78. Межгосударственный стандарт. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения нитрит-ионов.

16. ГОСТ 33045—2014. Межгосударственный стандарт. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ.

17. ГОСТ 23268.17—78. Межгосударственный стандарт. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения хлорид-ионов.

18. ГОСТ 34774—2021. Межгосударственный стандарт. Вода питьевая. Вода подготовленная (исправленная) для изготовления алкогольной продукции. Определение pH потенциометрическим методом.

19. ГОСТ 31940—2012. Межгосударственный стандарт. Вода питьевая. Методы определения содержания сульфатов.

20. ГОСТ 33045—2014. Межгосударственный стандарт. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ.

21. ГОСТ 31954—2012. Межгосударственный стандарт. Вода питьевая. Методы определения жесткости.

22. СанПин 1.2.3684—21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

23. СанПин 1.2.3685—21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

24. Лазарева Г. А. Оценка качества поверхностных вод по интегральным показателям (на примере Верхне-

волжского водохранилища) / Г. А. Лазарева, А. В. Кленова // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 6.

25. Администрация Ленинградской области Комитет по природным ресурсам Ленинградской области: об экологической ситуации в Ленинградской области в 2021 году. — СПб., 2022. — 246 с.

26. Стольберг Ф. В. Экология города / Ф. В. Стольберг. — К.: Либра, 2000. — 464 с.

Дата поступления: 12.03.2023
Решение о публикации: 23.04.2023

**Контактная информация:**
ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна — канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru
БЕЛОВА Полина Алексеевна — студент группы БТБ-208; linbelal@mail.ru

## Analysis and Assessment of the Quality of Surface Waters in the Priozersky District of the Leningrad Region

**A. V. Kharlamova, P. A. Belova**

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

**For citation:** Kharlamova A. V., Belova P. A. Analysis and Assessment of the Quality of Surface Waters in the Priozersky District of the Leningrad Region // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 404–413. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-404-413

**Summary**
**Purpose:** The study of water quality indicators of surface water bodies of the Priozersky district of the Leningrad region using laboratory studies, as well as the assessment of the ecological state of water sources based on various integral characteristics of surface water pollution. To determine the quality indicators of surface waters for cultural and household purposes in the laboratory. Assess the ecological state of a polluted reservoir based on the calculated integral indicators: the reservoir pollution index, the trophic state assessment index and the specific combinatorial index of surface water pollution. Consider possible options for improving the environmental situation of the studied water bodies. **Methods:** Water sampling from five water bodies of the Priozersky district of the Leningrad region for further laboratory studies. Analysis of selected samples from water sources to determine the composition of surface water for the presence of pollutants and water quality parameters using standardized methods. Comparison of the obtained results with the norms of maximum permissible concentrations for given indicators. **Results:** It has been established that in three of the five studied water bodies, excesses of the standard values for several indicators are found. One of the polluted water sources, the Vuoksa River, has been selected for further calculation of integral indicators of surface water quality. An assessment of the ecological state of this water body is given according to three calculated indicators. Measures have been proposed to improve the environmental situation of water bodies in the region. **Practical significance:** It is shown that the insufficiently studied water bodies of the Priozersky district of the Leningrad region generally meet the quality standards for surface waters, however, some objects still belong to the category of moderately polluted, which requires further in-depth study of their condition in order to prevent an increase in pollution.

**Keywords:** Water body, surface waters, pollution, hydrochemical indicator, integral quality indicator, water body pollution index, specific combinatorial pollution index, trophic state index, water quality class.

## References

1. *Ministerstvo prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii: gosudarstvennyy doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2016 godu*" [Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation: state report "On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2016"]. Moscow: NIA-Priroda Publ., 2017, 300 p. (In Russian)

2. Suntsova E. B. *Kompleksnaya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya prirodnykh ob"ektov posle zakrytiya predpriyatiy tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti: dissertatsiya* [Comprehensive assessment of the ecological state of natural objects after the closure of the pulp and paper industry: dissertation]. St. Petersburg, 2003, 183 p. (In Russian)

3. Mitrukova G. G., Kapustin, L. L., Kurashov E. A. Dinamika sostoyaniya bakterioplanktona Shchuch'ego zaliva Ladozhskogo ozera posle zakrytiya Priozerskogo TsBK [Dynamics of the state of bacterioplankton in the Pike Bay of Lake Ladoga after the closure of the Priozersk pulp and paper mill]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions]. St. Petersburg, 2021, Iss. 3(87), pp. 66–74. (In Russian)

4. Mitrukova G. G., Kapustin L. L., Kurashov E. A. Ekologicheskaya otsenka kachestva vod litoral'noy zony Ladozhskogo ozera po rezul'tatam mikrobiologicheskikh issledovaniy [Ecological assessment of water quality in the littoral zone of Lake Ladoga based on the results of microbiological studies]. *Gidrobiologiya* [Hydrobiology]. St. Petersburg, 2020, pp. 88–100. (In Russian)

5. Krylova Yu. V., Kurashov E. A., Ponomarenko A. M. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya litoral'noy zony Ladozhskogo ozera po rezul'tatam issledovaniy 2019 goda [Assessment of the ecological state of the littoral zone of Lake Ladoga based on the results of research in 2019]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. St. Petersburg, 2022, Iss. 6, pp. 102–120. (In Russian)

6. *FGBU "Severo-Zapadnoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy". Kachestvo vod poverkhnostnykh vodnykh ob"ektov v dekabre 2020 g.* [Federal State Budgetary Institution "North-Western Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring". Water quality of surface water bodies in December 2020]. St. Petersburg, 2021. (In Russian)

7. Akhtyamov R. G. *Otsenka i puti umen'sheniya ekologicheskoy opasnosti ob"ektov avtotransportnoy infrastruktury urbanizirovannoy territorii: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Evaluation and ways to reduce the environmental hazard of objects of motor transport infrastructure in an urbanized area: abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet Publ., 2009, 19 p. (In Russian)

8. Akhtyamov R. G., Senyushkin N. S., Sukhanov A. V. Razrabotka metodiki vyyavleniya potentsial'no opasnykh ob"ektov [Development of a methodology for identifying potentially hazardous objects]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University]. 2011, vol. 7, Iss. 5, pp. 192–197. (In Russian)

9. Axtyamov R. G., Elizar'ev A. N., Senyushkin N. S. et al. Podkhody k otsenke kriticheskogo sroka ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh [Approaches to assessing the critical life of technological equipment at hazardous production facilities]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2012, Iss. 5, p. 122. (In Russian)

10. Elizar'ev A. N., Akhtyamov R. G., Aksenov S. G. Sovremennye tekhnologii zashchity ob"ektov transportnoy infrastruktury na osnove modelirovaniya opasnykh situatsiy [Modern technologies for the protection of transport infrastructure facilities based on the simulation of dangerous situations]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2018, Iss. 10(214), pp. 23–28. (In Russian)

11. *GOST R 59024—2020. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [GOST R 59024—2020. National standard of the Russian Federation. Water. General requirements for sampling]. (In Russian)

12. *GOST R 55684—2013. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Voda pit'evaya. Metod opredeleniya permanganatnoy okislyaemosti* [GOST R 55684—2013. National standard of the Russian Federation. Drinking water. Method for determining permanganate oxidizability]. (In Russian)

13. *GOST 4011—72. Mezhgosudarstvennyy standart. Voda pit'evaya. Metody izmereniya massovoy kontsentratsii obshchego zheleza* [GOST 4011—72. Interstate standard. Drinking water. Methods for measuring the mass concentration of total iron]. (In Russian)

14. *GOST R 57164—2016. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Voda pit'evaya. Metody opredeleniya zapakha, vkusa i mutnosti* [GOST R 57164—2016. National standard of the Russian Federation. Drinking water. Methods for determining odor, taste and turbidity]. (In Russian)

15. *GOST 23268.8—78. Mezhgosudarstvennyy standart. Vody mineral'nye pit'evye lechebnye, lechebno-stolovye i prirodnye stolovye. Metody opredeleniya nitrit-ionov* [GOST 23268.8—78. Interstate standard. Mineral waters for drinking medicinal, medical table and natural table waters. Methods for determination of nitrite ions]. (In Russian)

16. *GOST 33045—2014. Mezhgosudarstvennyy standart. Voda. Metody opredeleniya azotsoderzhashchikh veshchestv* [GOST 33045—2014. Interstate standard. Water. Methods for determination of nitrogen-containing substances]. (In Russian)

17. *GOST 23268.17—78. Mezhgosudarstvennyy standart. Vody mineral'nye pit'evye lechebnye, lechebno-stolovye i prirodnye stolovye. Metody opredeleniya khlorid-ionov* [GOST 23268.17—78. Interstate standard. Mineral waters for drinking medicinal, medical table and natural table waters. Methods for determination of chloride ions]. (In Russian)

18. *GOST 34774—2021. Mezhgosudarstvennyy standart. Voda pit'evaya. Voda podgotovlennaya (ispravlennaya) dlya izgotovleniya alkogol'noy produktsii. Opredelenie rN potentsiometricheskim metodom* [GOST 34774—2021. Interstate standard. Drinking water. Water prepared (corrected) for the manufacture of alcoholic beverages. Determination of pH by the potentiometric method]. (In Russian)

19. *GOST 31940—2012. Mezhgosudarstvennyy standart. Voda pit'evaya. Metody opredeleniya soderzhaniya sul'fatov* [GOST 31940—2012. Interstate standard. Drinking water. Methods for determining the content of sulfates]. (In Russian)

20. *GOST 33045—2014. Mezhgosudarstvennyy standart. Voda. Metody opredeleniya azotsoderzhashchikh veshchestv* [GOST 33045—2014. Interstate standard. Water. Methods for determination of nitrogen-containing substances]. (In Russian)

21. *GOST 31954—2012. Mezhgosudarstvennyy standart. Voda pit'evaya. Metody opredeleniya zhestkosti* [GOST 31954—2012. Interstate standard. Drinking water. Methods for determining stiffness]. (In Russian)

22. *SanPin 1.2.3684—21. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k soderzhaniyu territoriy gorodskikh i sel'skikh poseleniy, k vodnym ob"ektam, pit'evoy vode i pit'evomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukhu, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy* [SanPin 1.2.3684—21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures]. (In Russian)

23. *SanPin 1.2.3685—21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [SanPin 1.2.3685—21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. (In Russian)

24. Lazareva G. A., Klenova A. V. Otsenka kachestva poverkhnostnykh vod po integral'nym pokazatelyam (na primere Verkhnevolzhskogo vodokhranilishcha) [Assessment of the quality of surface waters by integral indicators (on the example of the Upper Volga reservoir)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2015, Iss. 6. (In Russian)

25. *Administratsiya Leningradskoy oblasti Komitet po prirodnym resursam Leningradskoy oblasti: ob ekologicheskoy situatsii v Leningradskoy oblasti v 2021 godu* [Administration of the Leningrad Region Committee for Natural Resources of the Leningrad Region: on the environmental situation in the Leningrad Region in 2021]. St. Petersburg, 2022, 246 p. (In Russian)

26. Stol'berg F. V. *Ekologiya goroda* [Ecology of the city]. K.: Libra Publ., 2000, 464 p. (In Russian)

Received: March 12, 2023
Accepted: April 23, 2023

**Author's information:**

Alina V. KHARLAMOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; alavina@yandex.ru

Polina A. BELOVA — Student of BTB-208 group; linbelal@mail.ru

УДК 514.181.6

# Аксонометрические проекции в России: вчера, сегодня, завтра

**Н. А. Елисеев, Ю. Г. Параскевопуло, Н. Н. Елисеева**

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

**Для цитирования:** *Елисеев Н. А., Параскевопуло Ю. Г., Елисеева Н. Н.* Аксонометрические проекции в России: вчера, сегодня, завтра // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 414–423. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-414-423

## Аннотация

**Цель:** В работе рассмотрены: история развития аксонометрических проекций, установлен вклад отечественных ученых в теорию данного метода, проведен анализ сегодняшнего состояния нормативной базы, обоснована необходимость внесения изменений в действующий стандарт. В статье, опираясь на архивные и рукописные источники, показан путь последовательного возникновения, развития и совершенствования теории аксонометрических проекций, показаны примеры использования ее в различные периоды. Установлен вклад российских ученых в совершенствование теории метода аксонометрии, и рассмотрено применение ее в строительстве и промышленности. Показаны главные преимущества аксонометрии: наглядность и возможность определения параметров реального объекта по таким изображениям. Проанализированы неточности представления теории аксонометрии в современных нормативных документах. Указана необходимость изображения аксонометрических осей при построении изображений. Аксонометрические проекции рассмотрены как элемент САПР, что позволяет создавать единую информационную модель объекта, проводить совместную работу различных специалистов на этапах проектирования, обеспечивать хранение и редактирование информации об объекте. **Методы:** Для достижения результатов выполнены ретроспектива, анализ, сравнение и обобщение исторических, научных и нормативных источников. **Результаты:** Обоснована необходимость внесения изменений в действующий нормативный документ. **Практическая значимость:** Правильное отображение теории аксонометрии в нормативном документе устранит противоречия при применении в практике и в подготовке специалистов.

**Ключевые слова:** Аксонометрическая проекция, комплексный чертеж, параллельное проецирование, геометрическое моделирование, аксонометрические оси, обратимость чертежа, трехмерное твердотельное моделирование, информационное моделирование.

## Введение

При проектировании плоскостных и объемных объектов разрабатываются их чертежи, получаемые методом ортогонального проецирования на одну или несколько плоскостей. По чертежам, используя стандартные методы, устанавливаются истинные размеры объектов и их частей, но по ним не всегда возможно получить полное представление об изображаемом объекте.

Актуальность теории аксонометрических проекций объясняется наглядностью и точностью их построения. Преимущества аксонометрических проекций наиболее очевидны в инженерно-строительной, машиностроительной и архитектурной практике, где построение данных проекций получило особо широкое применение. При помощи данных проекций иллюстрируются общие виды (фасады) проектируемых зданий и сооружений, конструкции перекрытий,

сложных узлов, врубок, частей железобетонных конструкций и т. п.

## Становление и развитие аксонометрии (вчера)

С давних времен люди стремились изобразить окружающий мир с возможной достоверностью, используя различные приемы. Доаксонометрические изображения появились в глубокой древности. Для передачи глубины картины приемы условной аксонометрии использовались в Египте, Месопотамии, древней Греции, древнем Риме, Византии, странах средневековой Европы. В Древней Руси данные приемы применялись совместно с другими способами изображения.

Условная аксонометрия использовалась при составлении планов и карт, первые изображения появились в связи с необходимостью определять границы земельных участков, составлять схемы торговых путей, военных и прочих объектов. Выглядели такие планы, как эскизы без определенного масштаба, но с примерным соблюдением расстояний между зданиями, сооружениями и другими доминирующими объектами. Сами объекты изображались в виде схематичных рисунков с использованием условной аксонометрии.

Развитие европейского общества, техники и производства вызвало необходимость развития и совершенствования методов изображения. Возникла необходимость разработки способа и принципов построения наглядных изображений для представления достоверного образа объекта, наиболее приближенного к реальному объекту. Таким способом явилась практическая аксонометрия.

К концу XVI в. аксонометрические проекции получили более широкое распространение. Разработке теории и практики проекций посвящены работы французского математика Жерара Дезарга, немецкого математика Иоганна Кеплера, немецкого живописца Альбрехта Дюрера и др.

Появление первых чертежей в строительстве относится к XVII веку. С развитием в XVIII в. таких наук, как геодезия, картография, начертательная геометрия и инженерная графика, изображения планов объектов становятся все более похожими на современные. Появляются такие понятия, как масштаб, условные обозначения. Чертежи применяются для изображения сухопутных, речных путей и границ [1]. Наглядность изображений достигалась применением нескольких точек зрения, а также методами центрального и параллельного проецирования (рис. 1) [2].

Первым в российской школе начертательной геометрии применил изображения, близкие к аксонометрическим, инженер-путеец, выпускник и профессор Института корпуса инженеров путей сообщения —

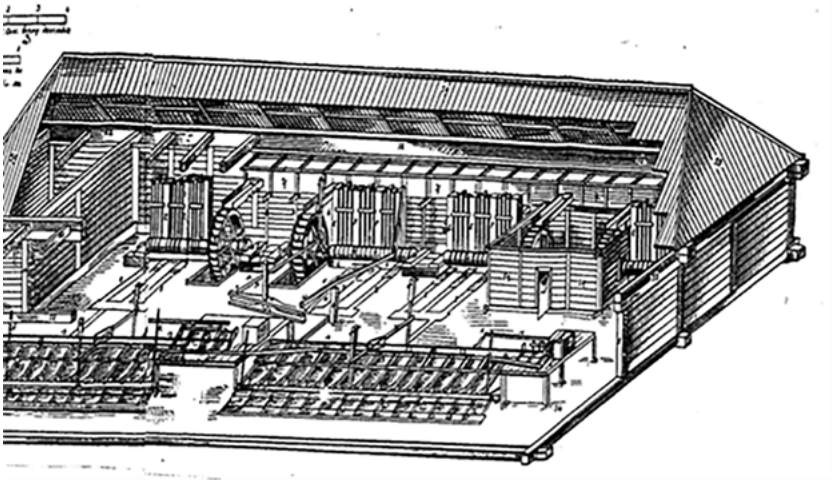


Рис. 1. Аксонометрия здания фабрики. Фрагмент чертежа Змеиногорского рудника. К. Д. Фролов. 1779 г.

ИКИПС Я. А. Севастьянов, основоположник начертательной геометрии в России [3, 4].

Впервые опубликовал работу «Об изометрической проекции» на русском языке в «Журнале главного управления путей сообщения и публичных зданий» профессор, инженер-путеец А. Х. Редер в 1855 г. [5].

Русские ученые — профессор Н. И. Макаров (1824–1904) [6] и профессор ИКИПС, инженер-путеец В. И. Курдюмов (1853–1904) [7] — издали ряд научных работ, где излагалась теория и развитие методов изображений. Курдюмов предлагает образец изометрической клетчатки, доказывает, что для точного определения положения объекта в пространстве необходимы его проекции и аксонометрические оси. В зависимости от расположения плоскостей проекций и направления проецирования он устанавливает виды аксонометрических проекций. Особое внимание уделяет рассмотрению прямоугольной изометрической и косоугольной проекции, показывает применение аксонометрических проекций для интерполирования земляных профилей, подробно описывает выполнение аксонометрических эскизов. Он отмечает необязательность отображения аксонометрических координатных осей на чертежах, так как они совпадают с направлениями главнейших измерений предмета, ребрами объекта или осями координат.

В конце XIX века профессор Московского университета Ф. Е. Орлов определил зависимости между осями диметрии и триметрии. В 1884 г. А. Фролов [8] представил теоретическое обоснование метода параллельного косоугольного проецирования. С 1902 г. в работах российских ученых стала исследоваться теорема Польке — Шварца, являющаяся основной теоремой аксонометрии. Профессор ЛИИЖТ, инженер-путеец Д. И. Каргин (1880–1949) посвятил этой теме свои работы по теории аксонометрии и перспективы [9–18]. Профессор Д. И. Каргин в диссертации «Точность графических расчетов» [19] и в работе «Исторические данные о глазе» [20] вывел зависимость порога узнавания величины и формы объекта от угла поворота к линии взора при различных дистанциях наблюдения. Об этом же он писал при исследовании древнерусской иконописи и книжной миниатюры. Исследовались источники в XVI–XVII вв., где иллюстрировались процессы строительства зданий, изготовления сложных изделий (рис. 2) [21]. Можно заметить, что изображение выполнено во фронтальной аксонометрии.

Рис. 2. Миниатюра. XVII–XVIII вв.

Продолжили исследования в области аксонометрических проекций российские ученые Н. А. Рынин, А. И. Добряков, Н. Ф. Четверухин и др.

В 1980 г. Б. В. Раушенбах [22] доказал с применением методов математического моделирования и закономерностей зрительного восприятия человека, что близкорасположенные объекты воспринимаются

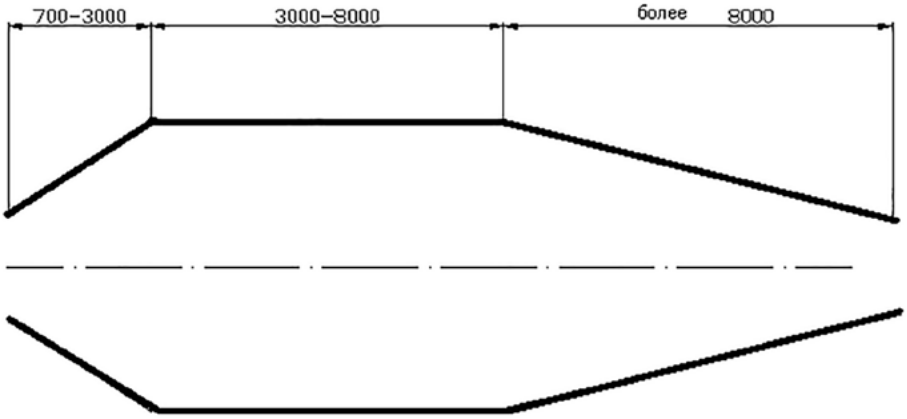



Рис. 3. Восприятие параллельных прямых на различном расстоянии

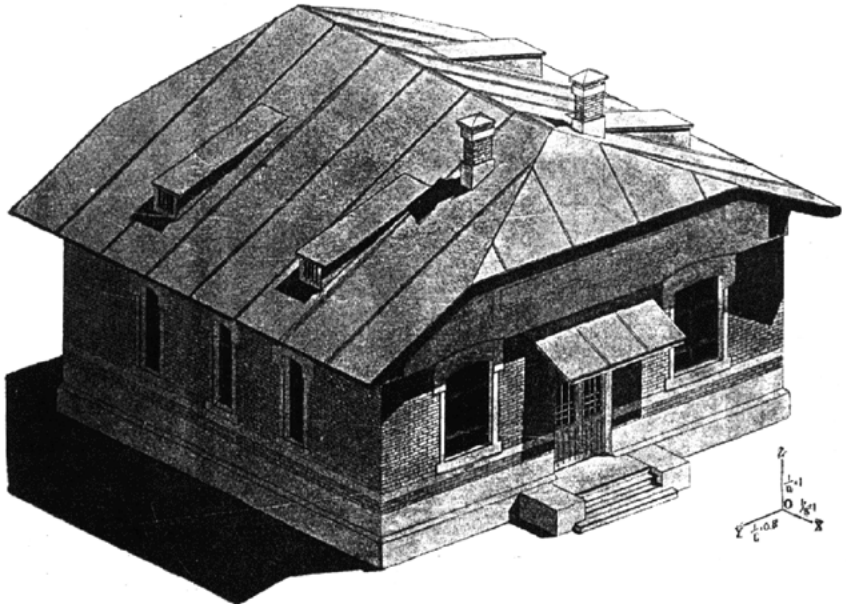


Рис. 4. Аксонометрия здания с падающими тенями

наблюдателем в обратной перспективе, для объектов среднего плана — в аксонометрии, а для удаленных областей пространства — в линейной перспективе (рис. 3).

С течением времени теория аксонометрии постоянно развивалась и совершенствовалась.

В первых стандартах ОСТ 350-358 (1928) и ОСТ 7534 (1936) [23], необходимых для единой технической терминологии, для выполнения на чертежах устанавливались три вида стандартных аксонометрических проекций: прямоугольные изометрия и диметрия, а также косоугольная фронтальная изометрия.

## Применение аксонометрических проекций в практике (сегодня и завтра)

Сегодня аксонометрические проекции применяются во многих областях техники, в дизайне и изобразительном искусстве.

При выполнении технической документации на строительство, монтаж либо изготовление объекта необходимо дополнять комплект чертежей наглядным изображением объекта. Аксонометрия способна быть визуальным носителем информации об объекте. Простота построения аксонометрических проекций определяет их применение, данные проекции обладают

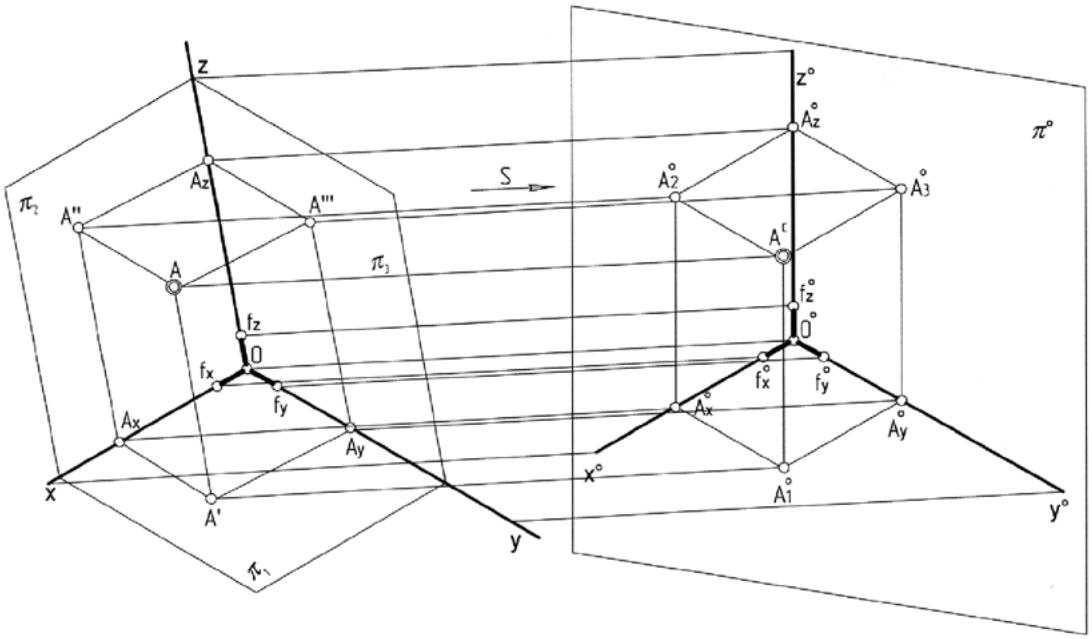



Рис. 5. Теоретическая модель аксонометрического проецирования

не только свойством наглядности, но и одновременно свойством обратимости, специалист может представить не только форму, но и положение объекта в пространстве (рис. 4).

Все вышеуказанные исследования ученых показывают, что аксонометрическая проекция — это параллельная проекция геометрического объекта вместе с координатной системой, к которой он отнесен, на специально выбранную плоскость $\pi^0$ (рис. 5).

Для различных видов аксонометрий при различных углах наклона проецирующих лучей к картине σ возникают различные коэффициенты искажения $k_i$ по осям.

Теоретическими исследованиями установлена следующая зависимость коэффициентов искажения и угла наклона [23]:

$$k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 = 2 + \mathrm{ctg}^2\,\sigma.$$

Используя данную зависимость, можно установить коэффициенты искажения по осям для различных типов аксонометрических проекций. Так, в прямоугольных аксонометриях угол наклона лучей σ = 90°, значит:

$$k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 = 2.$$

В прямоугольной изометрической аксонометрии коэффициенты искажения по осям равны $k_1 = k_2 = k_3 = k$, следовательно:

$$3k^2 = 2;\ k = \sqrt{2/3} \approx 0{,}82.$$

В прямоугольной диметрической аксонометрии размеры по оси *y* уменьшаются в два раза $k_1 = k_3 = k$, а $k_2 = 0{,}5k$, следовательно:

$$2k^2 + 0{,}25k^2 = 2;\ k = \sqrt{8/9} \approx 0{,}94,\ \text{т. е.}$$

$$k_1 = k_3 = 0{,}94;\ \ k_2 = 0{,}47.$$

Применяемые в инженерной практике проекции включены в государственный стандарт [24], где установлены основные пять типов проекций и коэффициенты искажения. Необходимо подчеркнуть, что в указанном нормативном документе имеется неточность в определении аксонометрической проекции, что вносит противоречия при практическом применении аксонометрии и подготовке специалистов.

ГОСТ устанавливает, что аксонометрической является «проекция на плоскость с помощью параллельных лучей, идущих из центра проецирования (который удален в бесконечность), через каждую

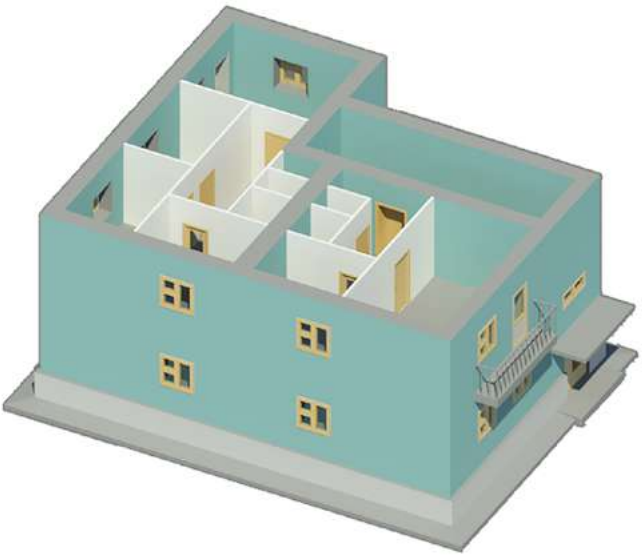


Рис. 6. 3D-модель здания, выполненная в программе Revit

точку объекта до пересечения с плоскостью, на которую проецируется объект».

Построенное в соответствии с приведенным определением изображение не будет обратимым. Отсутствие аксонометрических осей не позволяет установить форму, размеры объекта и его положение в пространстве. Помимо этого, под данное определение подходит любая параллельная проекция, например построение падающих теней. Падающая тень (рис. 4) от здания является совокупностью точек пересечения световых лучей *s*, проходящих через точки крыши здания, с поверхностью, на которую падает тень.

Для приведения определения в соответствие с теорией метода в стандарт необходимо внести изменения. Надлежит вернуться к определению, вытекающему из исследований ученых: «аксонометрическая проекция — это параллельная проекция геометрического объекта вместе с координатной системой, к которой он отнесен, на специально выбранную плоскость $\pi^0$» [23–26].

Теоретические представления, нормативная база и практический опыт специалистов при построении аксонометрических проекций нашли свое воплощение в разработке систем автоматизированного проектирования объектов. За последние годы разработаны различные CAD/CAM/CAE системы, имеющие различные области применения.

При помощи САПР формируются модели сложной техники, объектов строительства, искусственных сооружений и др. Учитывая, что графическая информация и ее визуальное восприятие в процессе проектирования имеют все возрастающее значение, обработка информации в виде геометрических моделей средствами компьютерной графики, особенно геометрическое 3D-моделирование [26, 27], приобретает актуальность.

В процессе работы модуля трехмерного твердотельного моделирования создается виртуальная математическая модель детали, изделия и т. п., имеющая реальные физические свойства и т. д.

Дальнейшим шагом в развитии моделирования можно считать информационное моделирование, получившее свое начало в сфере проектирования объектов капитального строительства [28]. Создаваемая посредством специализированных программ Revit, Allplan, Archicad, Renga, трехмерная геометрическая модель здания «наполняется» информацией, в том числе снабжается пространственно-временными привязками, обеспечивая представление всех физических и функциональных характеристик объекта. В результате такого подхода к проектированию предполагается получение единой информационной модели объекта, позволяющей не только проводить совместную работу различных специалистов на этапе проектирования, но также хранить, обмениваться и своевременно редактировать всю имеющуюся информацию. Такой принцип работы, конечно, требует на начальном своем этапе некоторых затрат, но в то же время позволяет существенно упростить совместную работу над проектом, избежать коллизий при проектировании, а также на финальном этапе позволяет быстро получать всю необходимую информацию об объекте, включая чертежи, визуальные образы и наглядные изображения (рис. 6).

## Заключение

Метод аксонометрических проекций постоянно развивается и совершенствуется. Научные и практические разработки российских ученых являются основой для дальнейшего развития методов изображения и создания виртуальных математических моделей объектов с применением различных систем автоматизированного проектирования.

Основываясь на истории развития и современной теории метода аксонометрических проекций, можно утверждать, что в действующий стандарт ГОСТ 2.317 надлежит внести изменения. Следует установить следующее определение: аксонометрическая проекция — это параллельная проекция геометрического объекта вместе с координатной системой, к которой он отнесен, на специально выбранную плоскость.

## Библиографический список

1. Воронин Н. Н. Очерки по истории русского зодчества / Н. Н. Воронин. — М.-Л., 1934.

2. Виргинский В. С. Творцы новой техники в крепостной России: Очерки жизни и деятельности выдающихся русских изобретателей XVIII — пер. пол. XIX века / В. С. Виргинский. — М.: Госиздат, 1962. — 406 с.

3. Севастьянов Я. А. Основания начертательной геометрии / Я. А. Севастьянов. — СПб., 1821. — 186 с.

4. Севастьянов Я. А. Приложение начертательной геометрии к воздушной перспективе, к проекции карт и к гномонике / Я. А. Севастьянов. — СПб., 1831. — 157 с.

5. Редер А. Х. Об изометрической проекции / А. Х. Редер. СПб., 1861.

6. Макаров Н. И. Исторический очерк развития перспективы, как науки / Н. И. Макаров. — СПб., 1880. — 38 с.

7. Курдюмов В. И. Курс начертательной геометрии. Отдел I. Введение. Проекции ортогональные. Часть I. Проекции точек, линий и плоскостей / В. И. Курдюмов // Сборник Института Инженеров путей сообщения Императора Александра I. — Вып. XXXII. — СПб., 1895. — 431 с.

8. Фролов А. Дополнения к элементарной начертательной геометрии / А. Фролов // Элементарная начертательная геометрия с чертежами в тексте и с задачами для самостоятельной работы учащихся. Для реальных училищ. — СПб., 1884.

9. Каргин Д. И. К истории графики / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 191, б/д. — 215 л.

10. Каргин Д. И. Изображения у народов Древнего Востока архитектурных форм / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 197, б/д. — 28 л.

11. Каргин Д. И. Техническая графика античной Греции / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 194, б/д. — 3 л.

12. Каргин Д. И. Искусство древнего Востока // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 272, б/д. — 66 л.

13. Каргин Д. И. Очерк развития технической графики / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 193, б/д. — 76 л.

14. Каргин Д. И. Техническая графика в допетровской Руси / Д. И. Каргин. — Л., 1941. — 38 с.

15. Каргин Д. И. Чертежное дело в России в XVIII в. / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 193, 1949. — 183 л.

16. Каргин Д. И. Успехи науки технической графики за XXX лет Советской власти / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 32, 1947. — 336 л.

17. Каргин Д. И. Роль Института инженеров путей сообщения в деле насаждения начертательной геометрии в России / Д. И. Каргин // Тез. докл. IV научно-техн. конф. ЛИИЖТа. — Л.: ЛИИЖТ, 1939. — С. 146–147.

18. Каргин Д. И. Техническая графика в Древней Руси / Д. И. Каргин // Тез. докл. X научно-техн. конф. ЛИИЖТа. — Л.: ЛИИЖТ, 1947. — С. 158.

19. Каргин Д. И. Точность графических расчетов / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 10, II ч.,1937. — 383 л.

20. Каргин Д. И. Исторические данные о глазе. Глаз — анатомия и другое / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 27, б/д. — 47 л.

21. Каргин Д. И. Техническая графика в допетровской Руси / Д. И. Каргин // ПФА РАН, ф. 802, оп. 1, ед. хр. 190, 1940. — 195 л.

22. Раушенбах Б. В. Пространственные построения в живописи / Б. В. Раушенбах. — М.: Наука, 1980. — С. 165–184.

23. Каргин Д. И. Выбор наивыгоднейших аксонометрических проекций / Д. И. Каргин // ПФА РАН ф. 802, ед. хр. 302, 1938. — 104 л.

24. ГОСТ 2.317—2011. Единая система конструкторской документации. Аксонометрические проекции. — М.: АО «Кодекс», 2023. — 8 с.

25. Елисеев Н. А. Профессор Д. И. Каргин — исследователь истории и теории аксонометрии / Н. А. Елисеев. — Русская наука в биограф. очерках: Деятели русской науки. — СПб.: «Дмитрий Буланин»: СПбФ ИИЕТ, 2003. — С. 55–65.

26. Елисеев Н. А. Инженерная и компьютерная графика, Ч. 1: курс лекций / Н. А. Елисеев, Ю. Г. Параскевопуло, Д. В. Третьяков. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. — 145 с.

27. Елисеев Н. А. Роль технической графики в передаче информации / Н. А. Елисеев // Проблемы информатики: философия, науковедение, образование. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. — С. 297–300.

28. Елисеев Н. А. Изучение информационного моделирования зданий и сооружений в рамках дисциплины «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика» / Н. А. Елисеев, Н. Н. Елисеева, Е. Н. Параскевопуло // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции (09.06.2020). — М.: Спутник +, 2020. — 29 с. — С. 95–98.

Дата поступления: 03.04.2023
Решение о публикации: 23.04.2023

**Контактная информация:**
ЕЛИСЕЕВ Николай Александрович — канд. техн. наук, доц.; ena1981@yandex.ru
ПАРАСКЕВОПУЛО Юрий Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; 7540430@mail.ru
ЕЛИСЕЕВА Наталья Николаевна — канд. техн. наук, доц.; neliseeva83@mail.ru

## Axonometric Projections in Russia: Yesterday, Today, Tomorrow

### N. A. Eliseev, Yu. G. Paraskevopulo, N. N. Eliseeva

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

**For citation:** Eliseev N. A., Paraskevopulo Yu. G., Eliseeva N. N. Axonometric Projections in Russia: Yesterday, Today, Tomorrow // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 414–423. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-414-423

**Purpose:** The history of the development of axonometric projections is considered in this work. The contribution of Russian scientists to the theory of this method is established. The analysis of the current state of the regulatory framework has been carried out. The necessity of making changes to the current standard is justified. Archival and handwritten sources have been investigated. The article shows the way of the consistent emergence, development and improvement of the theory of axonometric projections. Examples of its use in different periods are shown. The contribution of Russian scientists to the improvement of the theory of the axonometry method and its application in construction and industry is established. The main advantages of axonometry are shown: visual clarity and the possibility to determine the parameters of a real object based on such images. The inaccuracies of the axonometry theory representation in modern regulatory documents are analyzed. The necessity to depict axonometric axes when creating images is indicated. Axonometric projections are considered as a method of geometric modeling in computer-aided design systems, which allows

creating visual planar models of artificial structures and other objects. This also allows to create a unified information model of the object, to carry out joint work of various specialists at the design stages, to ensure the storage and editing of information throughout the entire life cycle of the object. **Methods:** To achieve results, various research methods have been applied: theoretical analysis of historical, scientific literature, normative and program-methodical documentation, study of the experience of graphic images of foreign and domestic specialists, generalization and systematization of scientific provisions on the research topic, analysis of the results of research work. **Results:** The necessity of making changes to the existing regulatory documents is justified. **Practical significance:** The correct display of axonometry in regulatory documents will improve its practical application and specialist training.

**Keywords:** Axonometric projection, complex drawing, parallel projection, geometric modeling, axonometric axes, drawing reversibility, three-dimensional solid-state modeling, building information modeling.

## References

1. Voronin N. N. *Ocherki po istorii russkogo zodchestva* [Essays on the history of Russian architecture]. Moscow — Leningrad, 1934. (In Russian)

2. Virginiskii V. S. *Tvortsy novoi tekhniki v krepostnoi Rossii: Ocherki zhizni i deyatelnosti vydaiushchikhsya russkikh izobretatelei XVIII — per. pol. XIX veka* [Creators of new technology in serf Russia: Essays on the life and work of outstanding Russian inventors of the 18th to the mid-19th century]. Moscow: Gosizdat Publ., 1962, 406 p. (In Russian)

3. Sevastyanov Ya. A. *Osnovaniya nachertatel'noi geometrii* [Foundations of descriptive geometry]. St. Petersburg, 1821, 186 p. (In Russian)

4. Sevastyanov Ya. A. *Prilozhenie nachertatel'noi geometrii k vozdushnoi perspektive, k proektsii kart i k gnomonike* [Application of descriptive geometry to aerial perspective, map projection, and gnomonics]. St. Petersburg, 1831, 157 p. (In Russian)

5. Reder A. Kh. *Ob izometricheskoi proektsii* [On isometric projection]. St. Petersburg, 1861. (In Russian)

6. Makarov N. I. *Istoricheckii ocherk razvitiya perspektivy, kak nauki* [Historical essay on the development of perspective as a science]. St. Petersburg, 1880, 38 p. (In Russian)

7. Kurdyumov V. I. Kurs nachertatel'noi geometrii. Otdel I. Vvedenie. Proektsii ortogonal'nye. Chast' I. Proektsii tochek, linii i ploskostei [Course of descriptive geometry. Part I. Introduction. Orthogonal projections. Section I. Projections of points, lines, and planes]. *Sbornik Instituta Inzhenerov putei soobshcheniya Imperatora Alexandra I* [Collection of the Institute of Engineers of Communication Ways of Emperor Alexander I]. St. Petersburg, 1895, vol. 32, 431 p. (In Russian)

8. Frolov A. Doplneniya k elementarnoi nachertatel'noi geometrii [Additions to elementary descriptive geometry]. *Elementarnaya nachertatel'naia geometriia s chertezhami v tekste i s zadachami dlia samostoiatel'noi raboty uchashchikhsia. Dlia real'nykh uchilishch* [Elementary descriptive geometry with drawings in the text and problems for independent work of students. For real schools]. St. Petersburg, 1884. (In Russian)

9. Kargin D. I. *K istorii grafiki* [On the history of graphics]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. khr. 191, b/d, 215 p. (In Russian)

10. Kargin D. I. *Izobrazheniia u narodov Drevnego Vostoka arkhitekturnykh form* [Depictions of architectural forms among the peoples of the ancient East]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. khr. 197, b/d, 28 p.(In Russian)

11. Kargin D. I. *Tekhnicheskaya grafika antichnoy Gretsii* [Technical graphics of ancient Greece]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. kh. 194, b/d, 3 p. (In Russian)

12. Kargin D. I. *Iskusstvo drevnego Vostoka* [Art of ancient East]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. kh. 272, b/d, 66 p. (In Russian)

13. Kargin D. I. *Ocherk razvitiya tekhnicheskoy grafiki* [Overview of the development of technical graphics]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. kh. 193, b/d, 76 p. (In Russian)

14. Kargin D. I. *Tekhnicheskaya grafika v dopetrovskoy Rusi* [Technical graphics in pre-Petrine Russia]. Leningrad, 1941, 38 p. (In Russian)

15. Kargin D. I. *Chertezhnoye delo v Rossii v XVIII v.* [Drafting in Russia in the 18th century]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. kh. 193, 1949, 183 p. (In Russian)

16. Kargin D. I. *Uspekhi nauki tekhnicheskoy grafiki za XXX let Sovetskoy vlasti* [Successes of technical graphics science during XXX years of Soviet power]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. kh. 32, 1947, 336 p. (In Russian)

17. Kargin D. I. Rol' Instituta inzhenerov putey soobshcheniya v dele nasazhdeniya nachertatel'noy geometrii v Rossii [The role of the Institute of Railway Engineers in promoting descriptive geometry in Russia]. *Tez. dokl. IV nauchno-tekhn. konf. LIIZHTa* [Abstracts IV scientific and technical. conf. LIIZhTA]. Leningrad: LIIZHT Publ., 1939, pp. 146–147. (In Russian)

18. Kargin D. I. Tekhnicheskaya grafika v Drevney Rusi [Technical graphics in ancient Russia]. *Tez. dokl. X nauchno-tekhn. konf. LIIZHTa* [Abstracts X scientific and technical. conf. LIIZhTA]. Leningrad: LIIZHT Publ., 1947, pp. 158. (In Russian)

19. Kargin D. I. *Tochnost' graficheskikh raschetov* [Accuracy of graphic calculations]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. kh. 10, II ch.,1937, 383 p. (In Russian)

20. Kargin D. I. *Istoricheskiye dannyye o glaze. Glaz — anatomiya i drugoye* [Historical data about the eye. Eye — anatomy and others]. PFA RAN, f. 802, op. 1, ed. kh. (In Russian)

21. Kargin D. I. *Tekhnicheskaya grafika v dopetrovskoy Rusi* [Technical graphics in pre-Petrine Russia]. PFAN RAN, f. 802, op. 1, ed. hr. 190, 1940, 195 p. (In Russian)

22. Raushenbah B. V. *Prostranstvennye postroeniya v zhivopisi* [Spatial constructions in painting]. Moscow: Nauka Publ., 1980, pp. 165–184. (In Russian)

23. Kargin D. I. *Vybor naivygodneysheikh aksometricheskikh proektsiy* [Selection of the most advantageous axonometric projections]. PFAN RAN f. 802, ed. hr. 302, 1938, 104 p. (In Russian)

24. GOST 2.317—2011. *Edinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii. Aksometricheskiye proektsii* [GOST 2.317—2011. Unified system of design documentation. Axonometric projections]. Moscow: AO "Kodeks" Publ., 2023, 8 p. (In Russian)

25. Eliseev N. A. Professor D. I. Kargin — issledovatel' istorii i teorii aksometrii [Professor D. I. Kargin — researcher of the history and theory of axonometry]. *Russkaya nauka v biograf. ocherkakh: Deyateli russkoy nauki* [Russian science in biographical sketches: Personalities of Russian science]. St. Petersburg: "Dmitry Bulanin": SPbF IIET Publ., 2003, pp. 55–65. (In Russian)

26. Eliseev N. A. *Inzhenernaya i kompyuternaya grafika, Ch. 1: kurs lektsiy* [Engineering and computer graphics, Part 1: Lecture course]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2017, 145 p. (In Russian)

27. Eliseev N. A. Rol' tekhnicheskoy grafiki v peredache informatsii [The role of technical graphics in information transmission]. *Problemy informatiki: filosofiia, naukovedenie, obrazovanie. Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Problems of computer science: philosophy, history, education. Proceedings of SPbGETU "LETI"]. St. Petersburg: SPbGETU "LETI" Publ., 2007, pp. 297–300. (In Russian)

28. Eliseev N. A., Eliseeva N. N., Paraskyevopulo E. N. Izuchenie informatsionnogo modelirovaniya zdaniy i sooruzheniy v ramkakh dis tsip liny "Nachertatel'naya geometriya, inzhenernaya i kompyuternaya grafika" [Studying information modeling of buildings and structures within the discipline "Descriptive geometry, engineering and computer graphics"]. *Innovatsionnyye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii (09.06.2020)* [Innovative technologies in construction and geoecology: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Internet Conference (06.09.2020)]. Moscow: Sputnik + Publ., 2020, 29 p., pp. 95–98. (In Russian)

Received: April 03, 2023
Accepted: April 23, 2023

**Author's information:**
Nikolay A. ELISEEV — PhD in Engineering,
Associate Professor; ena1981@yandex.ru
Yuri G. PARASKEVOPULO — PhD in Engineering,
Associate Professor; 7540430@mail.ru
Natalia N. ELISEEVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; neliseeva83@mail.ru

УДК 656.223

# Разработка метода оценки рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций

**Н. Г. Кобозева, А. В. Новичихин**

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

**Для цитирования:** *Кобозева Н. Г., Новичихин А. В.* Разработка метода оценки рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 424–432. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-424-432

## Аннотация

**Цель:** Разработка метода оценки рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций позволит создать эффективную методику транспортного обеспечения государственных перевозок. Целью является снижение неопределенностей при обеспечении государственных перевозок посредством идентификации основных причин рисков, возникающих в системе обеспечения железнодорожным подвижным составом, к которым относятся в том числе перевозки грузов для нужд МЧС. **Методы:** Сравнение и анализ показателей, характеризующих результаты последствий от возникновения негативных событий в системе обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок; моделирование оценки рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций. **Результаты:** Предложен метод моделирования возникновения рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций; получены оценки рисковых ситуаций по вариантам выбора подвижного состава с учетом ограничений по максимальному радиусу дислокации относительно места погрузки техники. **Практическая значимость:** Разработка методов и рекомендаций для повышения эффективности обеспечения подвижным составом государственных перевозок в условиях неопределенности.

**Ключевые слова:** Государственные перевозки, оценка рисков, подвижной состав, дислокация подвижного состава, сроки доставки.

Чрезвычайные ситуации — это сложно прогнозируемые процессы как по масштабам, так и по месту их возникновения. Как следствие, невозможно заранее планировать организационно-хозяйственные мероприятия по их ликвидации. Это приходится делать в срочном порядке и в сложных условиях, когда на первый план выходит критерий времени и качества организации процесса. Объектом анализа является транспортная система обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок грузов для ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Для ликвидации крупных ЧС, таких как лесные пожары, наводнения, паводки, необходимо большое количество техники, в том числе колесной и гусеничной. Не всегда в месте возникновения ЧС такой техники достаточно, поэтому зачастую ее необходимо доставлять из других регионов страны. Масштабы нашей страны и транспортная инфраструктура автомобильных дорог не

всегда позволяют обеспечить грузами пострадавшие регионы посредством автомобильного транспорта. В этом случае пользуются услугами железнодорожного транспорта. Форс-мажорные обстоятельства требуют максимально быстро и эффективно подать необходимый подвижной состав к местам погрузки техники и затем доставить ее в самые короткие сроки в нужную точку. При реализации абсолютно любого процесса возникают риски его невыполнения или срывов, как бы качественно не был организован процесс. В условиях ЧС риски должны быть минимизированы и в идеале сведены к нулю.

Если рассматривать риски как вероятность наступления негативных (с точки зрения конечного результата) последствий, то риск — это вероятность наступления события, влекущего возникновение за собой разного рода ущербов и других негативных последствий, зачастую необратимых [1, 2].

Анализ системы обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок, к которым относятся в том числе перевозки грузов для нужд МЧС России (Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий), то основными причинами рисков являются:

1. Несоответствие объемов перевозок наличию рабочего парка необходимого подвижного состава (ПС).

2. Нарушение сроков подачи к месту погрузки груза для нужд МЧС.

3. Невозможность выполнения договорных сроков подачи порожних вагонов под погрузку в связи с удаленным расположением мест дислокации требуемого подвижного состава.

4. Отказ компании-оператора предоставить требуемый подвижной состав.

5. Подача неисправного в техническом отношении подвижного состава.

6. Неполное соответствие требуемым параметрам поданного ПС.

7. Подача ПС в ненадлежащем состоянии (неочищенном) [3].

Эти причины вызывают возникновение следующих видов рисков:

– коммерческие риски — это срывы поставок, неготовность груза в срок к погрузке, нарушение договорных сроков, невыполнение финансовых обязательств сторон в ЛС и др.;

– технические риски, связанные с техническими неисправностями, которые, в свою очередь, могут привести к нарушению или срыву сроков, к чрезвычайным ситуациям на транспорте и другим рискам;

– операционные риски, связанные с человеческим фактором и процедурными вопросами обеспечения подвижным составом перевозочного процесса [4–7].

Для дальнейшего изучения вопроса необходимо определить вероятности возникновения рисков при организации процесса обеспечения необходимым железнодорожным подвижным составом государственных перевозок.

Согласно «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» [8] актуальной задачей является совершенствование нормативно-правового обеспечения транспортной системы и рынка транспортных услуг, в том числе обеспечения мобилизационной подготовки транспортных организаций и выполнения ими военно-транспортной обязанности. Решение данной научной задачи позволит снизить неопределенность в системе обеспечения ПС государственных перевозок для ликвидации ЧС и, как следствие, сводит к минимуму риски возникновения различных негативных событий на транспорте, в том числе железнодорожном.

Существуют договоры между государством и крупными компаниями — владельцами железнодорожного подвижного состава о том, что в слу-

чае форс-мажорных обстоятельств требуемый ПС будет изъят из оборота компаний и передан для государственных целей. ПС должен быть подан в исправном состоянии, в определенные сроки, в определенное место общего или необщего пользования под погрузку (например, колесной техники) и в кратчайшие сроки отправлен груженым к месту назначения. Убытки компаниям возмещаются за счет государства по установленным тарифам. С точки зрения государства необходима эффективная методика выбора и подачи ПС под погрузку, которая учитывает экономическую и техническую составляющие задачи транспортного обеспечения государственных перевозок [9–13]. Это одна из основных научных задач, которую необходимо решить для повышения эффективности организации государственных перевозок. Осуществляется выборка требуемых вагонов, находящихся в непосредственной близости к местам погрузки груза (например, колесной техники), то есть с учетом минимального расстояния и минимальной стоимости доставки к месту погрузки, что обеспечит в максимально короткие сроки доставку необходимого груза к месту ЧС. Для этого предлагается определить максимально возможный радиус расположения порожнего подвижного состава различных компаний-операторов относительно мест дислокации грузов, которые необходимо будет доставить к месту возникновения чрезвычайной ситуации.

Предлагаемый метод оценки рисков обеспечения железнодорожным подвижным составом государственных перевозок в условиях чрезвычайных ситуаций предложен впервые и состоит из следующих этапов:

1. Анализ дислокации требуемого порожнего подвижного состава операторских компаний с помощью автоматизированных систем, используемых в ОАО «РЖД» относительно мест погрузки грузов, необходимых для доставки к месту ЧС.

2. Определение сроков доставки потенциального подвижного состава к местам погрузки с различной скоростью (из-за разных базовых условий поставок).

3. Определение рисков нарушения нормативных сроков поставки порожнего подвижного состава к местам погрузки.

4. Определение максимально возможного радиуса, в пределах которого должен производиться выбор порожнего подвижного состава и его изъятие у компаний-операторов для дальнейшего использования в целях обеспечения государственных перевозок для решения задач ликвидации чрезвычайной ситуации.

Новизна метода заключается в учете и интегральной оценке рисков транспортного обеспечения для ликвидации ЧС для отбора практически реализуемых вариантов выбора подвижного состава и снижения ее неопределенностей.

Рассмотрим предложенный метод на следующем примере. Для определения рисков невыполнения сроков подачи железнодорожного подвижного состава к местам погрузки зададим минимальную нижнюю границу срока доставки порожнего подвижного состава с мест дислокации до мест погрузки — 1 сутки и верхнюю границу срока доставки — 3 суток. Среднесуточные скорости движения грузовых поездов примем от 400 до 1000 км/сут.

На основе имеющихся данных необходимо выполнить оценку вероятности попадания в обозначенный интервал. Рассмотрим возможность использования неравенства Чебышева для оценки рисков в транспортно-логистических процессах. Такой подход относится к статистическим методам оценки рисков. Неравенство Чебышева имеет вид [14]:

$$P(|x-\bar{X}|>\varepsilon)\le\frac{\sigma^2}{\varepsilon^2},$$

ТАБЛИЦА 1. Сроки доставки железнодорожного подвижного состава к местам погрузки техники

| Средняя скорость, км/сут | Срок доставки, час | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Расстояние, км | | | | | | | | | | | | | |
| | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 2000 | 3000 |
| 400 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 54 | 60 | 66 | 72 | 78 | 84 | 90 | 120 | 180 |
| 500 | 19,2 | 24 | 28,8 | 33,6 | 38,4 | 43,2 | 48 | 52,8 | 57,6 | 62,4 | 67,2 | 72 | 96 | 144 |
| 600 | 16 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 60 | 80 | 120 |
| 700 | 13,71 | 17,14 | 20,57 | 24 | 27,43 | 30,86 | 34,29 | 37,71 | 41,14 | 44,57 | 48 | 51,43 | 68,57 | 102,86 |
| 800 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 | 42 | 45 | 60 | 90 |
| 900 | 10,67 | 13,33 | 16 | 18,67 | 21,33 | 24 | 26,67 | 29,33 | 32 | 34,67 | 37,33 | 40 | 53,33 | 80 |
| 1000 | 9,6 | 12 | 14,4 | 16,8 | 19,2 | 21,6 | 24 | 26,4 | 28,8 | 31,2 | 33,6 | 36 | 48 | 72 |
| Средний срок доставки, час | 15,03 | 18,78 | 22,54 | 26,29 | 30,05 | 33,81 | 37,56 | 41,32 | 45,08 | 48,83 | 52,59 | 56,35 | 75,13 | 112,69 |

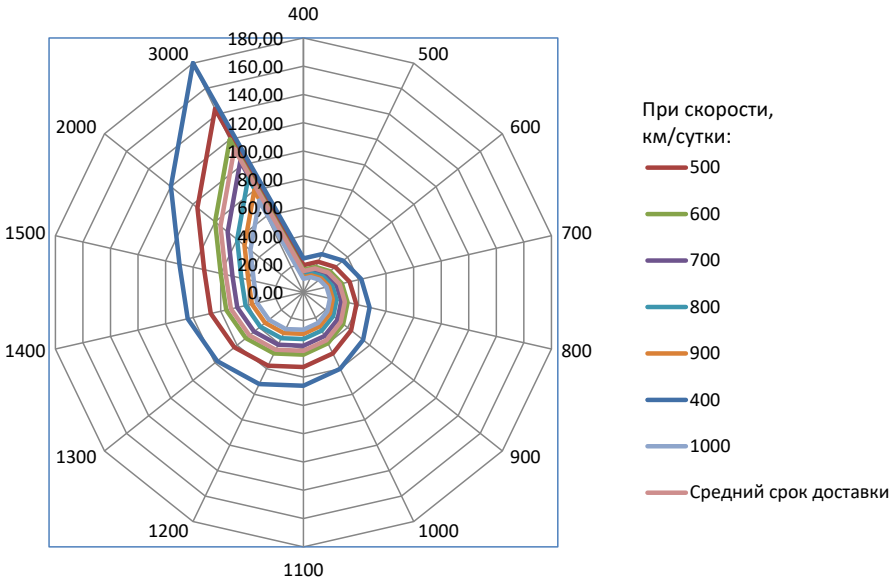



Рис. 1. Сроки доставки подвижного состава

где $P$ — вероятность (риск) непопадания в заданный интервал;

$\left|x-\overline{X}\right|$ — отклонение фактического значения величины от среднеарифметического;

$\sigma^2$ — среднеквадратичное отклонение от среднего значения;

$\varepsilon$ — предельная ошибка выборки.

Для определения интегрального риска $R_u$ для $u$-го варианта обеспечения подвижным составом на основе балльной шкалы воспользуемся выражением [15]:

$$R_u = \sum_{q=1}^{Q} \alpha_q \cdot R_q, \text{ при } \sum_{q=1}^{Q} \alpha_q = 1; \alpha_q \geq 0,$$

где $\alpha_q$ — весовой коэффициент $q$-го риска;

$R_q$ — риск $q$-го вида.

Под риском понимается наибольшая из вероятностей непопадания в требуемый интервал от 1 до 3 суток. Однако в нашем случае подача подвижного состава ранее нижней границы интервала является событием благоприятным. Поэтому необходимо рассматривать только риски, когда срок подачи подвижного состава выходит за пре-

ТАБЛИЦА 2. Определение риска по вариантам дислокации

| Расстояние перевозки, км | Средний срок доставки, час | Время до границы интервала, час | | Вероятность доставки | | Риск, $R_и$ | Величина отклонения в квадрате, $\varepsilon^2$ | | Дисперсия времени доставки, $\sigma^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | До нижней границы (24 часа) | До верхней границы (72 часа) | Ранее нижней границы | Позднее верхней границы | | До нижней границы (24 часа) | До верхней границы (72 часа) | |
| 400 | 15,03 | 8,97 | 56,97 | 0,1403 | 0,0035 | 0,0035 | 80,54 | 3246,05 | 22,60 |
| 500 | 18,78 | 5,22 | 53,22 | 0,6487 | 0,0062 | 0,0062 | 27,22 | 2832,12 | 35,32 |
| 500 | 22,54 | 1,46 | 49,46 | 11,9096 | 0,0104 | 0,0104 | 2,14 | 2446,41 | 50,86 |
| 700 | 26,30 | –2,30 | 45,70 | 6,5701 | 0,0166 | 0,0166 | 5,27 | 2088,93 | 69,22 |
| 800 | 30,05 | –6,05 | 41,95 | 1,1073 | 0,0230 | 0,0230 | 36,62 | 1759,66 | 81,11 |
| 900 | 33,81 | –9,81 | 38,19 | 0,5948 | 0,0392 | 0,0392 | 96,20 | 1458,62 | 114,43 |
| 1000 | 37,56 | –13,56 | 34,44 | 0,3586 | 0,0556 | 0,0556 | 184,00 | 1185,79 | 131,95 |
| 1100 | 41,32 | –17,32 | 30,68 | 0,2849 | 0,0908 | 0,0908 | 300,02 | 941,20 | 170,94 |
| 1200 | 45,08 | –21,08 | 26,92 | 0,2290 | 0,1403 | 0,1403 | 444,26 | 724,82 | 203,43 |
| 1300 | 48,83 | –24,83 | 23,17 | 0,1936 | 0,2224 | 0,2224 | 616,73 | 536,66 | 238,75 |
| 1400 | 52,59 | –28,59 | 19,41 | 0,1694 | 0,3675 | 0,3675 | 817,42 | 376,73 | 276,90 |
| 1500 | 56,35 | –32,35 | 15,65 | 0,1519 | 0,6487 | 0,6487 | 1046,32 | 245,02 | 317,87 |
| 2000 | 75,13 | –51,13 | –3,13 | 0,1126 | 30,0629 | 30,063 | 2614,20 | 9,79 | 588,76 |
| 3000 | 112,69 | –88,69 | –40,69 | 0,0808 | 0,3839 | 0,3839 | 7866,60 | 1655,99 | 1271,46 |

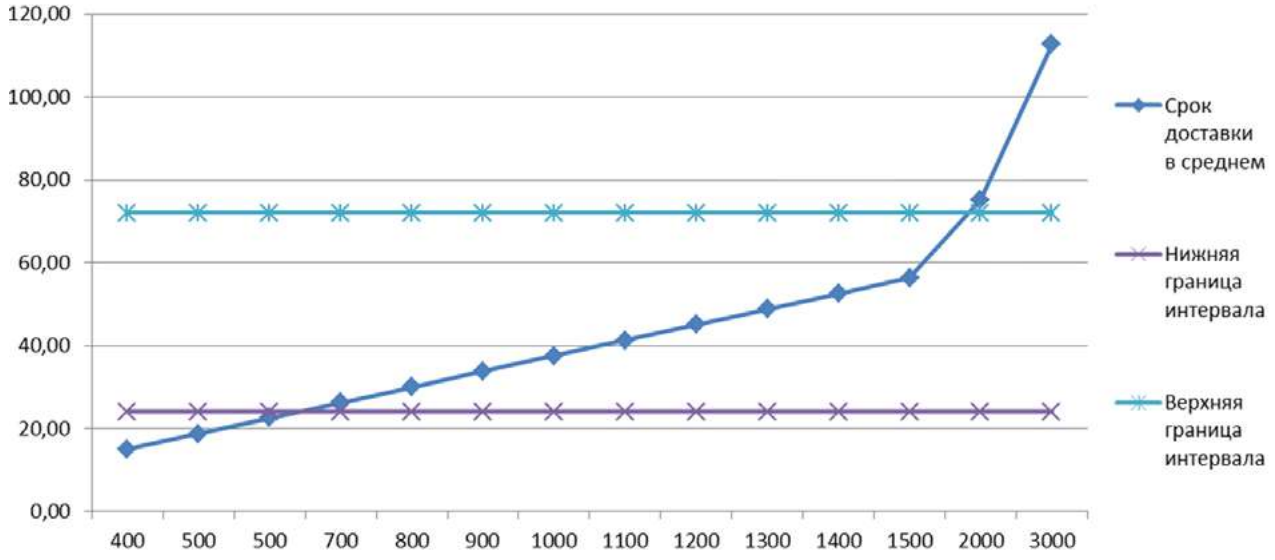



Рис. 2. Соотношение средних сроков доставки и нормативного интервала

делы верхней границы нормативного интервала. Таким образом, подвижной состав должен быть подан к месту погрузки техники за время, не превышающее 3 суток, то есть 72 часа. Расстояние дислокации требуемого подвижного состава компаний-операторов может быть различным. При выборе подвижного состава компаний-операторов должен быть учтен критерий норматив-

ного времени подачи к местам погрузки. Определенные сроки доставки без учета времени на начально-конечные операции (на расстояния от 400 до 3000 км) отображены в табл. 1.

Данные табл. 1 отображены на рис. 1.

Данные по определению рисков прибытия ранее и позднее срока, а также реального риска срыва нормативного срока (выход за границы верхнего интервала) приведены в табл. 2.

На основании модельных экспериментов построена диаграмма (рис. 2).

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что при выборе подвижного состава необходимо задавать максимальный радиус дислокации относительно места погрузки техники в срок от 1 до 3 суток, который, исходя из расчетов, должен быть равен 1920 км. Начиная с этого расстояния, срок подачи подвижного состава к местам погрузки превышает 3 суток (72 часа).

Таким образом, доказана необходимость введения ограничений по выбору подвижного состава, исходя из места их дислокации относительно мест погрузки, для дальнейшего следования к местам ЧС, что приведет к повышению эффективности использования государственных средств для обеспечения государственных перевозок. Одним из направлений развития предлагается определять вероятности возникновения потерь как для государства, так и для компаний-операторов, что позволит находить оптимальные решения, не оказывая негативного влияния на процесс достижения цели — обеспечение всех необходимых условий для скорейшей ликвидации чрезвычайных ситуаций. Приоритетность выбора основана на рейтинге компаний-операторов или удобстве их выбора для ОАО «РЖД». Руководствоваться же в подобных ситуациях необходимо первоочередным критерием: вовремя оказать помощь в ликвидации или предотвращении ЧС при минимальных рисках и затратах.

## Библиографический список

1. Плоткин Б. К. Введение в коммерцию и коммерческую логистику: учебное пособие / Б. К. Плоткин. — СПб.: СПбУЭФ, 1996. — 171 с.

2. Бродецкий Г. Л. Управление рисками в логистике: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / Г. Л. Бродецкий, Д. А. Гусев, Е. А. Елин. — М.: Академия, 2010. — 192 с.

3. Кобозева Н. Г. Эффективность системы железнодорожных перевозок в условиях появления и роста приватного парка: маркетинговые и операционные аспекты / Н. Г. Кобозева, А. А. Воронов // Экономика устойчивого развития. — 2022. — № 2(50). — С. 97–99.

4. Бродецкий Г. Л. Моделирование логистических систем. Оптимальные решения в условиях риска / Г. Л. Бродецкий. — М.: Вершина, 2006.

5. Москвин В. Л. Управление рисками при реализации инвестиционных проектов / В. А. Москвин. — М.: Финансы и статистика, 2004.

6. Корпоративная логистика. 300 ответов на вопросы профессионалов / Под общ. и науч. редакцией проф. В. И. Сергеева. — М.: ИНФРА-М, 2005. — 976 с.

7. Деленьян Б. А. Проблемы и возможности повышения потребительской ценности предложения на рынке e-commerce на основе совершенствования логистических процессов / Б. А. Деленьян, Д. П. Кайфеджан, А. А. Воронов и др. // Практический маркетинг. — 2022. — № 1(298). — С. 31–36.

8. Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: http://pravo.gov.ru, 3 декабря 2021 г., «Собрание законодательства РФ», 13 декабря 2021 г., № 50 (часть IV), ст. 8613.

9. Положение о системе управления рисками ОАО «РЖД», утверждено решением совета директоров ОАО «РЖД» (протокол от 7 декабря 2015 г. № 22). — URL: https://ar2016.rzd.ru/pdf/ar/ru/risk-management_system.pdf (дата обращения: 22.01.2023).

10. Межгосударственный стандарт «Управление рисками на железнодорожном транспорте» (дата введения: 1 сентября 2016 г.). ГОСТ 33433—2015. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200127759 (дата обращения: 22.01.2023).

11. Стандарт ОАО «РЖД» «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла» (УРРАН). Распоряжения ОАО «РЖД» от 4 декабря 2019 г. № 2722/р. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: https://docs.cntd.ru/document/1200127759 (дата обращения: 22.01.2023).

12. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте (редакция 1.1) (31 июля 2010 г.). — URL: https://studfile.net/preview/4547424/ (дата обращения: 22.01.2023).

13. Методика ОЖД «Методика по идентификации, анализу, оценке и управлению рисками» (30 июня 2010 г). — URL: https://portal.edu.asu.ru/ (дата обращения: 22.01.2023).

14. Плетнева Н. Г. Управление рисками в логистике: учебное пособие / Н. Г. Плетнева. — СПб.: СПбГЭУ, 2014. — 124 с.

15. Новичихин А. В. Особенности распределения ресурсов в инфраструктурных проектах автодорожного комплекса с учетом стратегических рисков / А. В. Новичихин, В. А. Буйвис // Управление рисками в экономике: проблемы и решения: труды научно-практической конференции с зарубежным участием РИСК'Э — 2020. — СПб.: Политех-Пресс, 2021. — С. 80–85.

Дата поступления: 13.04.2023
Решение о публикации: 12.05.2023

**Контактная информация:**
КОБОЗЕВА Нона Гивиевна — ст. преподаватель кафедры «Логистика и коммерческая работа»; nona-kobozeva@yandex.ru
НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, и. о. зав. кафедрой «Логистика и коммерческая работа»; novitchihin@bk.ru

## Development of a Method for Assessing the Risks of Providing State Transportation with Railway Rolling Stock in Emergency Situations

**N. G. Kobozeva, A. V. Novichikhin**

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

**For citation:** Kobozeva N. G., Novichikhin A. V. Development of a Method for Assessing the Risks of Providing State Transportation with Railway Rolling Stock in Emergency Situations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 424–432. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-424-432

### Summary
**Purpose:** The development of a method for assessing the risks of providing state transportation with railway rolling stock in emergency situations will create an effective method of transport support for state transportation. Purpose is to reduce uncertainties in the provision of public transportation by identifying the main causes of risks arising in the system of providing railway rolling stock, which include, inter alia, the transportation of goods for the needs of the EMERCOM of Russia. **Methods:** Comparison and analysis of indicators characterizing the results of the consequences of the occurrence of negative events in the system of providing state transportation with railway rolling stock; modeling of risk assessment of providing state transportation with railway rolling stock in emergency situations. **Results:** A method of modeling the occurrence of risks of providing state transportation with railway rolling stock in emergency situations is proposed; estimates of

risk situations are obtained according to the options for choosing rolling stock, taking into account restrictions on the maximum radius of dislocation relative to the place of loading of equipment. **Practical significance:** Development of methods and recommendations to improve the efficiency of providing rolling stock for public transportation in conditions of uncertainty.

**Keywords:** State transportation, risk assessment, rolling stock, dislocation of rolling stock, delivery time.

## References

1. Plotkin B. K. *Vvedenie v kommertsiyu i kommercheskuyu logistiku: uchebnoe posobie* [Introduction to commerce and commercial logistics: textbook]. St. Petersburg: SPbUEF Publ., 1996, 171 p. (In Russian)

2. Brodetskiy G. L., GusevD. A., Elin E. A. *Upravlenie riskami v logistike: ucheb. posobie dlya stud. uchrezhdeniy vyssh. prof. obrazovaniya* [Risk management in logistics: textbook. allowance for students institutions of higher prof. education]. Moscow: Akademiya Publ., 2010, 192 p. (In Russian)

3. Kobozeva N. G., Voronov A. A. Effektivnost' sistemy zheleznodorozhnykh perevozok v usloviyakh poyavleniya i rosta privatnogo parka: marketingovye i operatsionnye aspekty [Efficiency of the railway transportation system in the context of the emergence and growth of a private park: marketing and operational aspects]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development]. 2022, Iss. 2(50), pp. 97–99. (In Russian)

4. Brodetskiy G. L. *Modelirovanie logisticheskikh sistem. Optimal'nye resheniya v usloviyakh riska* [Modeling of logistics systems. Optimal solutions under risk]. Moscow: Vershina Publ., 2006. (In Russian)

5. Moskvin V. L. *Upravlenie riskami pri realizatsii investitsionnykh proektov* [Risk management in the implementation of investment projects]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 2004. (In Russian)

6. *Korporativnaya logistika. 300 otvetov na voprosy professionalov. Pod obshch. i nauch. redaktsiey prof. V. I. Sergeeva* [Corporate logistics. 300 answers to questions from professionals. Ed. and scientific edited by prof. V. I. Sergeev]. Moscow: INFRA-M Publ., 2005, 976 p. (In Russian)

7. Delen'yan B. A., Kayfedzhan D. P., Voronov A. A. et al. Problemy i vozmozhnosti povysheniya potrebitel'skoy tsennosti predlozheniya na rynke e-commerce na osnove sovershenstvovaniya logisticheskikh protsessov [Problems and opportunities for increasing the consumer value of the offer in the e-commerce market based on the improvement of logistics processes]. *Prakticheskiy marketing* [Practical Marketing]. 2022, Iss. 1(298), pp. 31–36. (In Russian)

8. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r "O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda" [Decree of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021 № 3363-r "On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period until 2035"]. *Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii* [Official Internet portal of legal information]. Available at: http://pravo.gov.ru, 3 dekabrya 2021 g., "Sobranie zakonodatel'stva RF", 13 dekabrya 2021 g., № 50 (chast' IV), st. 8613. (In Russian)

9. *Polozhenie o sisteme upravleniya riskami OAO "RZhD", utverzhdeno resheniem soveta direktorov OAO "RZhD" (protokol ot 7 dekabrya 2015 g. № 22)* [Regulations on the risk management system of Russian Railways, approved by the decision of the Board of Directors of Russian Railways (Minutes № 22 dated December 7, 2015)]. Available at: https://ar2016.rzd.ru/pdf/ar/ru/risk-management_system.pdf (accessed: January 22, 2023). (In Russian)

10. *Mezhgosudarstvennyy standart "Upravlenie riskami na zheleznodorozhnom transporte" (data vvedeniya: 1 sentyabrya 2016 g.). GOST 33433—2015. Bezopasnost' funktsional'naya. Upravlenie riskami na zheleznodorozhnom transporte* [Interstate standard "Risk management in railway transport" (date of introduction: September 1, 2016). GOST 33433—2015. The security is functional. Risk management in railway transport]. Available at: https://docs.cntd.ru/

document/1200127759 (accessed: January 22, 2023). (In Russian)

11. *Standart OAO "RZhD" "Upravlenie resursami, riskami i nadezhnost'yu na etapakh zhiznennogo tsikla" (URRAN). Rasporyazheniya OAO "RZhD" ot 4 dekabrya 2019 g. № 2722/r. Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov* [Standard of JSC "Russian Railways" "Management of resources, risks and reliability at the stages of the life cycle" (URRAN). Order of Russian Railways dated December 4, 2019 № 2722/r. Electronic fund of legal and normative-technical documents]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200127759 (accessed: January 22, 2023). (In Russian)

12. *Kontseptsiya kompleksnogo upravleniya nadezhnost'yu, riskami, stoimost'yu zhiznennogo tsikla na zheleznodorozhnom transporte (redaktsiya 1.1) (31 iyulya 2010 g.)* [The concept of integrated management of reliability, risks, life cycle costs in railway transport (version 1.1) (July 31, 2010)]. Available at: https://studfile.net/preview/4547424/ (accessed: January 22, 2023). (In Russian)

13. *Metodika OZhD "Metodika po identifikatsii, analizu, otsenke i upravleniyu riskami" (30 iyunya 2010 g)* [OZhD Methodology "Methodology for Identification, Analysis, Assessment and Management of Risks" (June 30, 2010)]. Available at: https://portal.edu.asu.ru/ (accessed: January 22, 2023). (In Russian)

14. Pletneva N. G. *Upravlenie riskami v logistike: uchebnoe posobie* [Risk management in logistics: textbook]. St. Petersburg: SPbGEU Publ., 2014, 124 p. (In Russian)

15. Novichikhin A. V., Buyvis V. A. *Osobennosti raspredeleniya resursov v infrastrukturnykh proektakh avtodorozhnogo kompleksa s uchetom strategicheskikh riskov. Upravlenie riskami v ekonomike: problemy i resheniya: trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii s zarubezhnym uchastiem RISK'E — 2020* [Features of resource allocation in infrastructure projects of the road complex, taking into account strategic risks. Risk management in the economy: problems and solutions: proceedings of a scientific and practical conference with foreign participation RISK'E — 2020]. St. Petersburg: Politekh-Press Publ., 2021, pp. 80–85. (In Russian)

Received: April 13, 2023
Accepted: May 12, 2023

**Author's information:**
Nona G. KOBOZEVA — Senior Lecturer, Department "Logistics and Commercial work";
nona-kobozeva@yandex.ru
Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Acting Head of the Department "Logistics and Commercial Work"; novitchihin@bk.ru

УДК 331.451

# Исследование смягчения вибраций и переизлученного шума в зданиях, создаваемых при движении железнодорожного транспорта

**А. Б. Завьялов, О. И. Копытенкова, А. М. Евстафьев**

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

**Для цитирования:** *Завьялов А. Б., Копытенкова О. И., Евстафьев А. М.* Исследование смягчения вибраций и переизлученного шума в зданиях, создаваемых при движении железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 433–440. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-433-440

## Аннотация

**Цель:** Представить интегрированную методологию, которая позволит смоделировать всю среду, от источника вибрации до переизлученного шума внутри зданий. Провести краткий параметрический анализ для того, чтобы показать возможности данного подхода при оценке эффективности мер по смягчению последствий от вибрации и переизлученным шумом. **Методы:** Оценка уровня звукового давления, создаваемого в жилых отсеках в результате прохождения поезда; анализ связанной системы «поезд — путь — земля — конструкция»; решение акустической части задачи. **Результаты:** Рассмотрена численная модель, основанная на подходе субструктурирования. Изучена мера по снижению уровня вибрации и переизлученного шума внутри здания, заключаемая в непрерывной системе «плавающая плита — путь», для которой были рассмотрены различные значения жесткости упругого мата под плитой. Установлено, что эффективность данной меры происходит от положительной комбинации двух существенных факторов: частотного содержания отклика и частоты среза, назначенной для каждого принятого решения. **Практическая значимость:** Представлена комплексная методика определения вибрации грунта и переизлученного шума, вызванного железнодорожным движением. Получена зависимость, что эффективность снижения уровня вибрации и переизлученного шума внутри здания будет выше, если применяется решение с малой частотой среза и отклик имеет наиболее значительное частотное содержание на высоких частотах.

**Ключевые слова:** Вибрация, переизлученный шум, акустическая модель, защита от переизлученного шума и вибрации, жесткость упругого мата под плитой.

В связи с ростом интенсивности железнодорожных перевозок отмечается увеличение шумового загрязнения окружающей среды в городах с линейными объектами железнодорожного транспорта и железнодорожными узлами. Кроме того, транспортный шум, проникающий в жилые и общественные здания, сопровождается вибрацией [1], возникающей из различных источников, вследствие чего появляются многочисленные жалобы недовольных жителей зданий, расположенных рядом с железнодорожной инфраструктурой [2]. Вибрация, в свою очередь, может создавать переизлучение шума. Это приводит к тому, что население, проживающее на территории, расположенной вдоль железнодорожных путей, находится в состоянии шумового дискомфорта [3]. В попытке лучше понять и внести свой вклад в решение этой проблемы существует потребность в эффективных и комплексных численных инструментах для прогнозирования

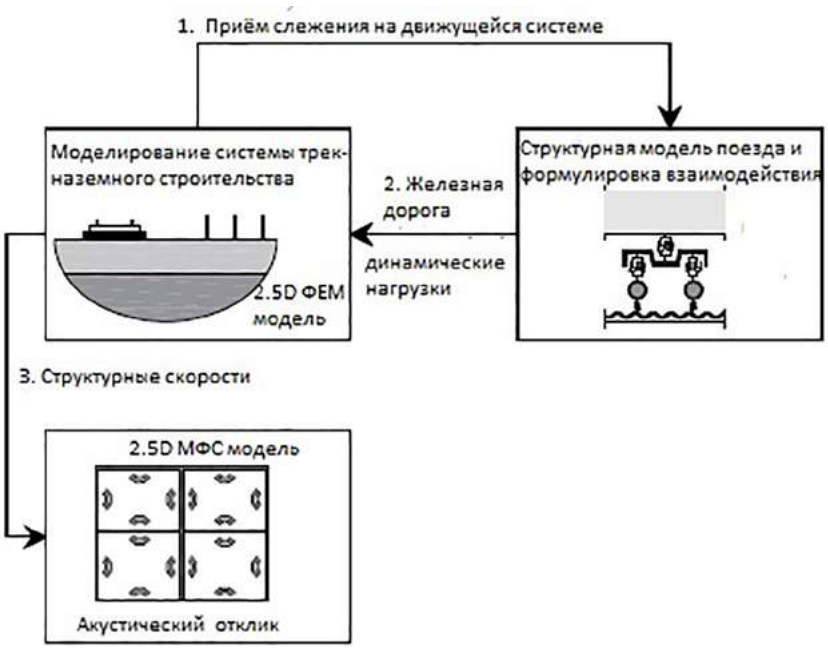



Рис. 1. Репрезентативная схема подхода численного моделирования

и смягчения негативных эффектов, вызванных железнодорожным движением, которые могут раздражать жителей вблизи железнодорожных инфраструктур. В данной статье представлена интегрированная методология, которая позволяет моделировать всю среду, от источника вибрации (взаимодействие транспортного средства с гусеницами) до переизлученного шума внутри зданий. Акустическая модель для оценки переизлученного шума внутри здания основана на методе фундаментальных решений (МФР). Кроме этого, проводится краткий параметрический анализ для того, чтобы показать возможности данного подхода при анализе эффективности мер по смягчению последствий, таких как, например, системы «плавающее перекрытие — путь» [4].

Для конкретного случая железнодорожной линии, разработанной в траншейном сечении, раздражение жителей воспринимается с точки зрения вибраций и переизлученного шума, поскольку прямой шум не достигает зданий или, по крайней мере, значительно ослабляется при установке шумозащитных барьеров [5]. Большая сложность проблемы в динамическом взаимодействии между различными предметами, имеющими различное поведение, а именно: взаимодействие между транспортным средством и трассой; взаимодействие между трассой и грунтом; взаимодействие между структурой и акустической системой, взаимодействие между транспортным средством и гусеницами; взаимодействие между гусеницами и грунтом; взаимодействие между гусеницами и акустической средой.

Решаемая задача состоит из смешанной эластодинамико-акустической задачи, где конечной целью является оценка уровня звукового давления, создаваемого в жилых отсеках в результате прохождения поезда [6]. Для этого случая сначала анализируется связанная система поезд — путь — земля — конструкция (эластодинамическая), а затем проводится решение акустической части задачи. На рис. 1 показаны основные части численной модели и их взаимодействие.

Как видно, численная модель, рассматриваемая для анализа, является модульной, основанной на подходе субструктурирования. Особое внимание будет уделено последней подобласти, где описывается акустическая субмодель.

Свойства различных предполагаемых матов

| Вид мата | Жесткость на метр в продольном направлении $k$ (Н/м$^2$) | Вязкое демпфирование на метр в продольном направлении $c$ (Н$_c$/м$^2$) | Частота отклика (Гц) | Частота среза (Гц) |
|---|---|---|---|---|
| Мягкий мат | $0{,}040 \cdot 10^9$ | $5{,}5 \cdot 10^4$ | 18,7 | 26,4 |
| Промежуточный мат | $0{,}153 \cdot 10^9$ | $5{,}5 \cdot 10^4$ | 26,4 | 37,3 |
| Жесткий мат | $0{,}283 \cdot 10^9$ | $5{,}5 \cdot 10^4$ | 37,3 | 52,8 |

Что касается стратегии моделирования взаимодействия поезда с рельсами, рассматриваются два компонента нагрузки [7]:

1) статическая нагрузка, возникающая в результате перемещения мертвых грузов, соответствующих весу поезда;

2) динамическая нагрузка, обусловленная динамическим взаимодействием между поездом и рельсами.

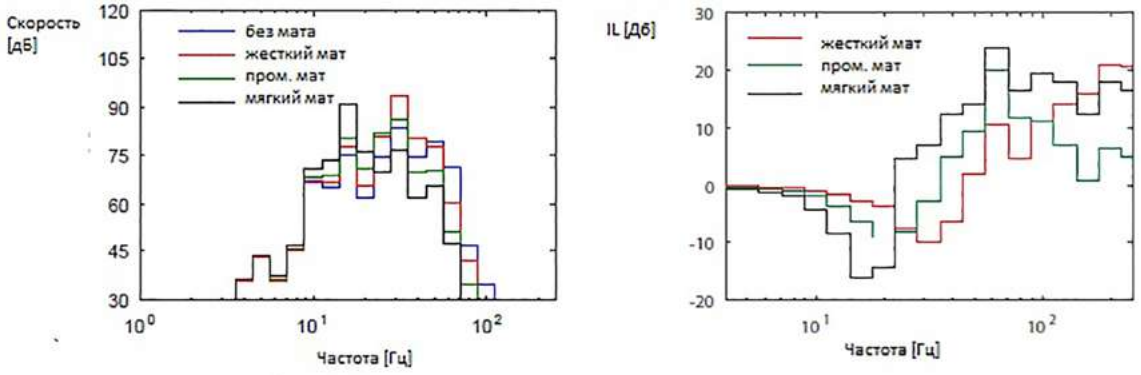
На основе этой 2,5D МФС модели можно рассчитать динамический отклик структуры вдоль границы раздела «структура — акустическая среда». Этот динамический отклик будет использоваться в качестве входных данных для акустической модели, т. е. принята формулировка без связи, предполагающая, что акустический отклик не влияет на упругий динамический отклик здания. Результаты, рассчитанные в терминах скоростей структурных колебаний вдоль границы раздела конструкций, которая ограничивает акустическое пространство, затем накладываются в качестве граничных условий для оценки уровней звукового давления, генерируемых внутри закрытого пространства (акустического отсека).

Выбранный пример соответствует железнодорожной линии с продольным развитием вдоль поперечного сечения траншеи, расположенной в урбанизированной среде. Вблизи железнодорожной линии предполагается наличие зданий с обеих сторон, что позволяет моделировать только половину поперечного сечения системы «путь — грунт — конструкция» из-за симметричного состояния задачи. Следует отметить, что это предположение подразумевает учет одинакового профиля неровностей для обоих рельсов, поскольку такое упрощение может повлиять на прогнозирование вибрации от грунта. Что касается железнодорожного пути, то предполагается непрерывная система «плавающая плита — путь» с различными значениями для матов под плитой-путем. Такие системы плавающих перекрытий обычно применяются для борьбы с явлениями чрезмерной вибрации и переизлученного шума внутри зданий. Переизлучение шума происходит тогда, когда зачастую неощутимая вибрация возбуждает колебания панелей здания, и некоторая часть колебательной энергии излучается в виде слышимого шума, обычно внутрь помещений [8]. Эффективность такого рода мер смягчения связана с введением новой резонансной частоты системы, т. е. с изменением динамического поведения железнодорожного пути, как показано ниже в таблице.

Независимо от принятого мата, предполагается непрерывная бетонная плита толщиной 0,3 м и шириной 2,5 м с продольной жесткостью на изгиб 1,62 × 108 Н/м$^2$ и массой 2800 кг на единицу длины.

Для того чтобы оценить эффект от внедрения упругого мата под плитой пути, на рис. 2 представлено сравнение вертикальной скорости, наблюдаемой в точке $S_1$ (расположенной на 1-м этаже здания), между неизолированным и изолированным железнодорожным путем (с различными упругими матами).

Введение упругого мата под плитой пути приводит к появлению новой резонансной частоты системы, что означает усиление отклика для




*а* *б*

Рис. 2. Частотное содержание вертикальной скорости в точке $S_1$:
*а* — третьоктавные полосы; *б* — кривые потерь на входе (дБ)

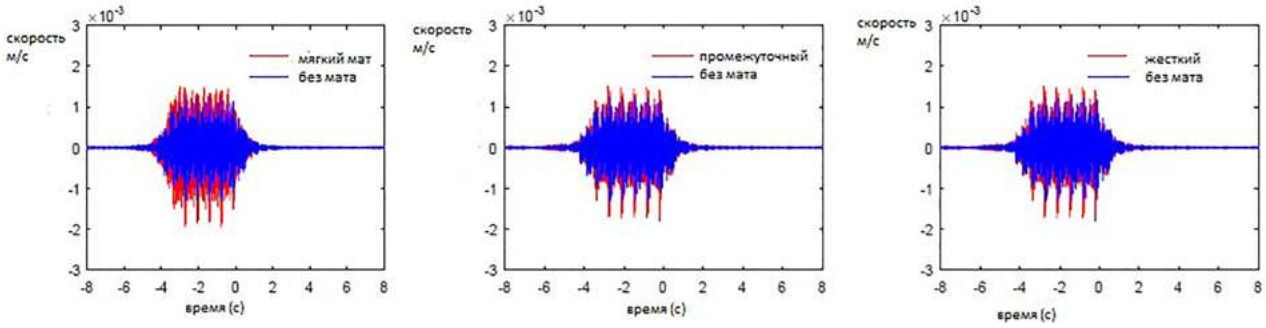



Рис. 3. Вертикальная скорость в точке $S_1$ для различных решений железнодорожного пути.

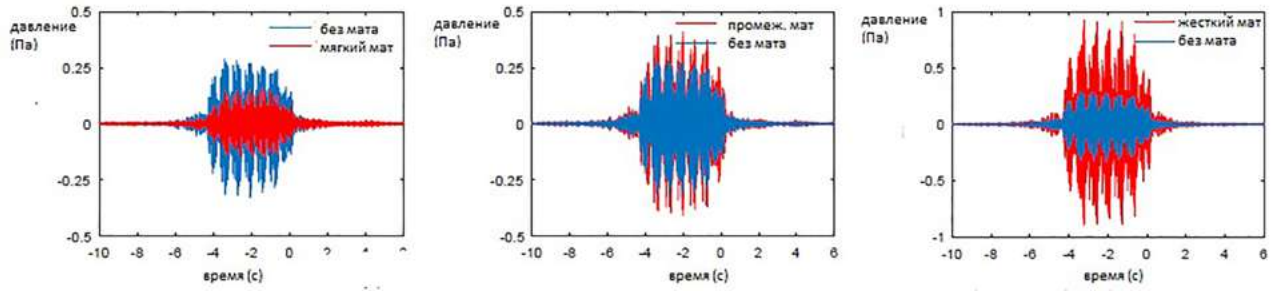
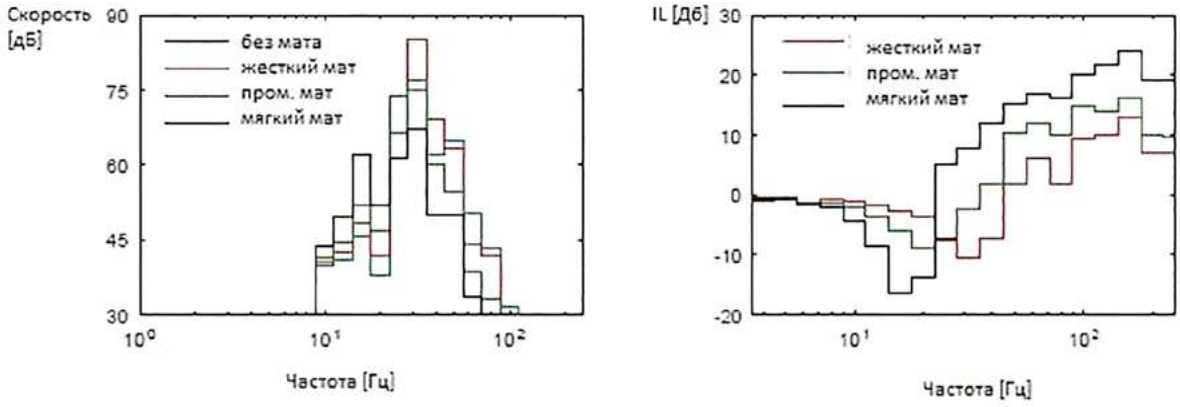



Рис. 4. Временная история акустического давления для точки $A_1$ во внутреннем пространстве, для различных упругих матов

частот вокруг резонансной частоты плиты пути и затухание энергии, передаваемой от пути к земле в диапазоне частот выше частоты среза [9]. Как можно видеть, польза от этих мер смягчения заметна только для частот больше, чем частота среза. Этот эффект сопровождается повышением уровня вибрации в диапазоне частот около частоты среза, что в большей степени относится к мату под плитой пути. Из временной записи (рис. 3) видно, что частоты, на которых усиливается динамический отклик, имеют соответствующий вклад в отклик, поскольку присутствие мата приводит к большим пиковым значениям вертикальной скорости плиты.

С точки зрения акустического отклика внутри здания [10] наблюдается большой контраст в зависимости от мата, принятого для железнодорожного пути. Анализируя результаты, полученные для точки $A_1$ (рис. 4, 5), можно сказать, что только более мягкое решение мата имеет явное




*а* *б*

Рис. 5. Частотное содержание акустического отклика в точке $A_1$:
*а* — третьоктавные полосы; *б* — кривые вносимых потерь (дБ)

преимущество в снижении уровня переизлученного шума, что также видно из представленной временной записи. Этот результат в основном связан с частотным содержанием вычисленного акустического поля, где максимальные значения уровней звукового давления смещены вправо по сравнению с частотным содержанием структурного отклика, как видно на рис. 6. Это условие в сочетании с более мягкой частотой среза мата (более низкая собственная частота и, следовательно, более низкая частота среза) приводит к эффективному снижению отклика.

В отличие от этого, другие системы «плавающая плита — путь» имеют поведение, аналогичное тому, которое наблюдается в структурном анализе. Таким образом, в отличие от решения дорожки с упругим матом, где явное преимущество возникает благодаря положительному сопряжению между доминирующим частотным содержанием отклика и собственной частотой, введенной решением дорожки, для более жесткого решения (и промежуточного) собственная частота близка к диапазону частот с более высоким частотным содержанием, оправдывая наблюдаемое усиление. С другой стороны, когда начинается снижение уровня звукового давления за счет применения упругого мата, содержание частот уже низкое, поэтому указанное решение не является очень эффективным.

В данной статье была представлена комплексная методика определения вибрации грунта и переизлученного шума, вызванного железнодорожным движением. Для этой задачи была рассмотрена численная модель, основанная на подходе субструктурирования. На основе рассчитанной динамической реакции конструкции была использована 2,5D модель МФС для оценки акустической реакции внутри отсеков здания. Кроме того, была изучена мера по снижению уровня вибрации и переизлученного шума внутри здания. Эта мера заключается в непрерывной системе «плавающая плита — путь», для которой были рассмотрены различные значения жесткости упругого мата под плитой. В целом эффективность данной меры происходит от положительной комбинации двух существенных факторов: частотного содержания отклика и частоты среза, назначенной для каждого принятого решения. Таким образом, эффективность будет выше, если применяется решение с малой частотой среза и отклик имеет наиболее значительное частотное содержание на высоких частотах. Этот вывод справедлив как для структурных, так и для акустических откликов.

## Библиографический список

1. Леванчук А. В. Гигиеническое обоснование методов снижения акустической нагрузки в жилых помещениях / А. В. Леванчук, О. И. Копытенкова, Т. А. Афанасьева // Здоровье населения и среда обитания. — 2020. — № 10(331). — С. 46–51.

2. Рябец В. В. Создание комфортной городской среды за счет обеспечения техносферной безопасности транспортных систем / В. В. Рябец // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: материалы VIII Международной научно-практической конференции. — СПб., 2022. — С. 114–117.

3. Рябец В. В. Особенности оценки комфортности среды городских поселений с учетом виброакустического воздействия в зоне влияния транспортных железнодорожных узлов / В. В. Рябец, А. В. Леванчук // Вестник Евразийской науки. — 2021. — Т. 13. — № 6.

4. Фиала П. Прогнозирование внутреннего шума в зданиях, создаваемого подземным железнодорожным движением / П. Фиала, Г. Дегранде // Журнал звука и вибрации. — № 293. — С. 680–690.

5. Канонин Ю. Н. Травматизм на объектах железнодорожного транспорта / Ю. Н. Канонин // Охрана труда и техносферная безопасность на объектах промышленности, транспорта и социальных инфраструктур: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции. — Пермь, 2023. — С. 226–229.

6. Терловая Н. В. Технологические решения по минимизации шума и вибрации на железнодорожном транспорте / Н. В. Терловая, А. А. Ступак // Проблемы и перспективы формирования инфраструктуры экономики знаний: сборник статей. — М., 2018. — С. 177–181.

7. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. — М., 2016.

8. Рябец В. В. Перспективный метод снижения виброакустической нагрузки вдоль линейных объектов железнодорожного транспорта / В. В. Рябец, М. С. Овчаренко // Сборник трудов III Бетанкуровского международного форума. — 2021. — Т. 2. — С. 125–127.

9. Панова А. А. Влияние железнодорожного транспорта на здоровье человека / А. А. Панова, А. Ю. Ермачкова, И. Г. Захарова // Молодежная наука: вызовы и перспективы: материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых. — Самара, 2020. — С. 341–343.

10. Акулова Е. А. Технология защиты зданий от вибрации / Е. А. Акулова // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей II Всероссийской конференции перспективных разработок. — М., 2021. — Т. 5. — С. 192–194.


Дата поступления: 28.04.2023
Решение о публикации: 15.05.2023

**Контактная информация:**
ЗАВЬЯЛОВ Алексей Борисович — аспирант, ассистент; zenitpiter91@inbox.ru
КОПЫТЕНКОВА Ольга Ивановна – д-р мед. наук, проф.; 5726164@mail.ru
ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — д-р техн. наук, проф.; evstafev@pgups.ru

# Study of Mitigation of Vibrations and Re-Radiated Noise in Buildings Created by Railway Traffic

**A. B. Zavyalov, O. I. Kopytenkova, A. M. Evstafiev**

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

**For citation:** Zavyalov A. B., Kopytenkova O. I., Evstafiev A. M. Study of Mitigation of Vibrations and Re-Radiated Noise in Buildings Created by Railway Traffic // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 433–440. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-433-440

**Summary**
**Purpose:** To present an integrated methodology that will model the entire environment, from the source of vibration to the re-radiated noise within buildings. Conduct a brief parametric analysis to show the potential of this approach in evaluating the effectiveness of mitigation measures for vibration and re-radiated noise. **Methods:** Estimate sound pressure levels generated in residential compartments as a result of train travel; analyze the coupled train-trail-ground-construction system; solve the acoustic part of the problem. **Results:** A numerical model based on the substructuring approach is considered. A measure to reduce the level of vibration and re-radiated noise inside the building has been studied, which consists in a continuous "floating slab-track" system, for which different values of the elastic mat stiffness under the slab have been considered. It has been found that the effectiveness of this measure comes from a positive combination of two essential factors: the frequency content of the response and the cutoff frequency assigned to each solution adopted. **Practical significance:** A comprehensive methodology for determining ground vibration and re-radiated noise caused by railway traffic is presented. The dependence is obtained, that the efficiency of reduction of vibration level and re-radiated noise inside the building, will be higher, if the solution with low cutoff frequency is applied and the response has the most significant frequency content at high frequencies.

**Keywords:** Vibration, re-radiated noise, acoustic model, protection against re-radiated noise and vibration, stiffness of the elastic mat under the slab.

## References

1. Levanchuk A. V., Kopytenkova O. I., Afanasyeva T. A. Gigienicheskoe obosnovanie metodov snizheniya akusticheskoy nagruzki v zhilyh pomesheniyah [Hygienic justification of methods to reduce the acoustic load in residential areas]. *Zdorov`e naseleniya i sreda obitaniya* [Population health and the environment]. 2020, Iss. 10(331), pp. 46–51. (In Russian)

2. Ryabets V. V. *Sozdanie komfortnoy gorodskoy sredy za schet obespecheniya tekhnosfernoy bezopasnosti transportnykh system. Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost na transporte: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Creation of a comfortable urban environment by ensuring the technospheric safety of transport systems. Technospheric and environmental safety in transport: materials of the VIII International scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022. pp. 114–117. (In Russian)

3. Ryabetc V. V., Levanchuk A. V. Osobennosti ocenki komfortnosti sredyi gorodskih poseleniy s uchetom vibroakusticheskogo vozdeystviya v zone vliyaniya transportnyih zheleznodorozhnyih uzlov [Peculiarities of assessing the comfort of the environment of urban settlements, taking into account the vibroacoustic impact in the zone of influence of transport railway hubs]. *Vestnik Evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2021, vol. 13, Iss. 6. (In Russian)

4. Fiala P., Degrande G. Prognozirovanie vnutrennego shuma v zdaniyakh, sozdavaemogo podzemnym zheleznodorozhnym dvizheniem [Prediction of internal noise in buildings caused by underground railway traffic]. *Zhurnal zvuka i vibratsii* [Journal of Sound and Vibration]. Iss. 293, pp. 680–690. (In Russian)

5. Kanonin Yu. N. *Travmatizm na obektakh zheleznodorozhnogo transporta. Okhrana truda i tekhnosfernaya bezopasnost na obektakh promyshlennosti, transporta i sotsialnykh infrastruktur: sbornik statey II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Injuries at railway transport facilities. Labor protection and technospheric safety at industrial, transport and social infrastructure facilities: collection of articles of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Perm, 2023. pp. 226–229. (In Russian)

6. Terlovaya N. V., Stupak A. A. *Tekhnologicheskie resheniya po minimizatsii shuma i vibratsii na zheleznodorozhnom transporte. Problemy i perspektivy formirovaniya infrastruktury ekonomiki znaniy* [Technological solutions to minimize noise and vibration in railway transport. Problems and prospects for the formation of the infrastructure of the knowledge economy]. Moscow, 2018, pp. 177–181. (In Russian)

7. Ivanov N. I. *Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borby s shumom: uchebnik* [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook]. Moscow, 2016. (In Russian)

8. Ryabetc V. V., Ovcharenko M. S. *Perspetivnyiy metod snizheniya vibroakusticheskoy nagruzki vdol` ob`ektov zheleznodorozhnogo transpotra. Sbornik trudov III Betankurovskogo mezhdunarodnogo foruma* [Promising method to reduce vibroacoustic load along linear objects of railway transport. Proceedings of the III Betancourt International Forum]. 2021, vol. 2, pp. 125–127. (In Russian)

9. Panova A. A., Ermachkova A. Yu., Zakharova I. G. *Vliyanie zheleznodorozhnogo transporta na zdorov'e cheloveka. Molodezhnaya nauka: vyzovy i perspektivy: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [The influence of railway transport on human health. Youth science: challenges and prospects: materials of the III All-Russian scientific and practical conference of students and young people scientists]. Samara, 2020. pp. 341–343. (In Russian)

10. Akulova E. A. *Tekhnologiya zashchity zdaniy ot vibratsii. Innovatsionnyy potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh: sbornik nauchnykh statey II Vserossiyskoy konferentsii perspektivnykh razrabotok* [Technology for protecting buildings from vibration. Innovative potential for the development of society: the view of young scientists: a collection of scientific articles of the II All-Russian Conference of Advanced Developments]. Moscow, 2021, vol. 5, pp. 92–194. (In Russian)

Received: April 28, 2023
Accepted: May 15, 2023

**Author's information:**
Alexey B. ZAVYALOV — Postgraduate Student, Assistant; zenitpiter91@inbox.ru
Olga I. Kopytenkova – Dr. Sci. in Medicine, Professor; 5726164@mail.ru
Andrey M. EVSTAFIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; evstafev@pgups.ru

УДК 504.06

# Экологическая оценка объектов окружающей среды при проведении инженерно-экологических изысканий

**Н. А. Горбунова, А. А. Федосеенко, М. С. Абу-Хасан**

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

**Для цитирования:** *Горбунова Н. А., Федосеенко А. А., Абу-Хасан М. С.* Экологическая оценка объектов окружающей среды при проведении инженерно-экологических изысканий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 441–447. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-441-447

## Аннотация

**Цель:** Оценить современное экологическое состояние участка изысканий, расположенного в Республике Карелии и предназначенного для прокладки железнодорожного пути необщего пользования. Проанализировать компонент окружающей среды — почву — на соответствие требованиям нормативной документации. Установить категорию загрязнения почв в соответствии с СанПиН 2.1.3684 и правила дальнейшего использования в соответствии с СанПиН 2.1.3685. **Методы:** Для оценки степени загрязнения почво-грунтов тяжелыми металлами и органическими экотоксикантами производился отбор проб с 14 пробных площадок. Оценка степени загрязнения почв тяжелыми металлами и бенз(а)пиреном проведена в соответствии с требованиями СанПиН 1.2.3685. Оценка степени загрязнения грунтов нефтепродуктами проведена в соответствии с письмом Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации. Оценка опасности загрязнения почв проводится по нескольким показателям (таблицы 4.3–4.5 СанПиН 2.1.3685):

– комплексом металлов для здоровья населения производится по показателю суммарного загрязнения (Zc);

– наличие/отсутствие превышения над установленными предельно допустимыми концентрациями (ПДК) и ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК).

Категория загрязнения устанавливается по наихудшему показателю. При установлении категорий загрязнения хуже, чем «Допустимая», разработаны рекомендации по дальнейшему использованию загрязненных грунтов (Приложение № 9 к СанПиН 2.1.3684). **Результаты:** В результате проведения испытаний было установлено, что почво-грунты, отобранные с участка изысканий при строительстве участка железнодорожного пути для необщего пользования, соответствуют категории загрязнения почв «Допустимая» и, в соответствии с правилами дальнейшего использования, попадают под «Использование без ограничений». **Практическая значимость:** Исследуемые грунты по всем показателям соответствуют требованиям нормативной документации и могут быть использованы без ограничений при строительстве участка железнодорожного пути для необщего пользования.

**Ключевые слова:** Экологическая оценка современного состояния, экотоксиканты, тяжелые металлы, нефтепродукты, бенз(а)пирен, инженерно-экологические изысканий.

Проведение оценки состояния объектов окружающей среды является неотъемлемой частью работ для рационального использования природных ресурсов, разработки необходимых мероприятий для защиты окружающей среды и принятия проектных решений.

В состав инженерно-экологических изысканий входят такие виды работ, как [1]:

– проведение полевых исследований, рекогносцировочное обследование участка изысканий, выявление источников загрязнения, выбор пробных площадок;

– отбор образцов, проб;

– проведение лабораторных работ;

– камеральная обработка результатов изысканий, в том числе изысканий прошлых лет, фондовых данных.

В соответствии с требованиями российского законодательства [2] инженерно-экологические изыскания входят в обязательный перечень работ.

Основными целям проведения комплексных инженерных изысканий, в том числе экологических, геологических, гидрометеорологических и геодезических, являются:

– снижение влияния антропогенного воздействия и защита окружающей среды;

– выявление вредных факторов воздействия на человека и разработка мероприятий по защите;

– инженерная защита зданий и сооружений от воздействия негативных факторов окружающей среды.

Подготовительный этап для проведения инженерно-экологических изысканий, в ходе которого разрабатывается программа работ, является важным этапом, определяющим виды и объемы работ.

Программа работ разрабатывается на основании технического задания и в соответствии с требованиями нормативной документации [1–5].

На участке проектирования железнодорожного пути необщего пользования к существующим путям была проведена оценка современного экологического состояния, были проанализированы такие компоненты окружающей среды, как почва, поверхностные и грунтовые воды.

Участок изысканий расположен в Республике Карелии. Линия прокладки железной дороги идет вдоль существующей линии Октябрьской железной дороги, густонаселенной местности с хорошо развитой инфраструктурой, прилегающие территории хорошо освоены и имеют различное хозяйственное назначение.

Участок работ расположен на территории с сильной степенью нарушенности земель. В первую очередь это касается грунтовых условий, растительного и животного мира, изменения ландшафта.

Для оценки степени загрязнения почвогрунтов тяжелыми металлами и органическими экотоксикантами производился отбор проб с 14 пробных площадок из следующих интервалов: 0,0–0,2 м; 0,2–1,0 м, 1,0–2,0 м.

Оценка степени загрязнения почв тяжелыми металлами и бенз(а)пиреном проведена в соответствии с СанПиН 1.2.3685—21 [4]. Оценка степени загрязнения грунтов нефтепродуктами проведена в соответствии с письмом Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации [6].

Оценка опасности загрязнения почв проводится по нескольким показателям (таблицы 4.3–4.5 СанПиН 2.1.3685—21 [4]):

– комплексом металлов для здоровья населения производится по показателю суммарного загрязнения (Zc);

– наличие/отсутствие превышения над установленными предельно допустимыми концентрациями (ПДК) и ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК).

Категория загрязнения устанавливается по наихудшему показателю. При установлении категорий загрязнения хуже, чем «допустимая», разработаны рекомендации по дальнейшему использованию загрязненных грунтов (Приложение № 9 к СанПиН 2.1.3684—21 [4]).

Результаты содержания загрязняющих веществ представлены в табл. 1. В табл. 2, 3 представлена оценка степени загрязнения грунтов по неорганическим и органическим экотоксикантам. Содержание тяжелых металлов в среднем находится на уровне значений ПДК (ОДК) или с небольшим превышением этих значений, что хорошо согласуется с данными, представленными в работах [7–10].

ТАБЛИЦА 1. Содержание загрязняющих неорганических и органических веществ

| Значение ПДК (ОДК) для супесей [4], мг/кг: | | | | | 2,10 | 55 | 33 | 0,50 | 32 | 20 | 2 | 0,02 | — |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Фоновое значение [7], мг/кг: | | | | | — | 67,6 | 37,9 | 0,52 | 23,3 | 7,2 | — | — | — |
| Точка отбора проб | Глубина отбора, м/тип почв | pH, ед. pH | Zc | Содержание в пробе, мг/кг | Hg | Zn | Cu | Cd | Pb | Ni | As | БП* | НП** |
| 1 | 0–0,2 | 7,8 | 3 | Ci | < 0,0001 | 40,0 | 25,1 | 0,14 | 15,4 | 19,3 | < 0,05 | 0,013 | 376 |
| | 0,2–1,0 | 7,7 | 2 | Ci | < 0,0001 | 27,4 | 12,8 | < 0,05 | 15,8 | 13,2 | < 0,05 | 0,01 | 166 |
| | 1,0–2,0 | 7,3 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 11,4 | 5,3 | < 0,05 | 2 | 5,5 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 2 | 0–0,2 | 7,7 | 3 | Ci | < 0,0001 | 50,8 | 21,9 | 0,11 | 15,2 | 19,8 | < 0,05 | 0,018 | 334 |
| | 0,2–1,0 | 7,5 | 2 | Ci | < 0,0001 | 22,1 | 13 | < 0,05 | 13,9 | 14,6 | < 0,05 | 0,011 | 161 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 9,1 | 7,1 | < 0,05 | 2,3 | 5,5 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 3 | 0–0,2 | 7,8 | 3 | Ci | < 0,0001 | 40,3 | 26,4 | 0,1 | 15,7 | 18,7 | < 0,05 | 0,017 | 354 |
| | 0,2–1,0 | 7,7 | 2 | Ci | < 0,0001 | 25,8 | 12,6 | < 0,05 | 18 | 13,7 | < 0,05 | 0,011 | 161 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 8,2 | 5,3 | < 0,05 | 3,1 | 5,1 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 4 | 0–0,2 | 7,8 | 3 | Ci | < 0,0001 | 39,5 | 28,6 | 0,11 | 13,4 | 18,6 | < 0,05 | 0,015 | 364 |
| | 0,2–1,0 | 7,7 | 2 | Ci | < 0,0001 | 23,0 | 12 | < 0,05 | 14,1 | 13,9 | < 0,05 | 0,011 | 128 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 11,6 | 7,5 | < 0,05 | 2,5 | 5,5 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 5 | 0–0,2 | 7,9 | 3 | Ci | < 0,0001 | 42,6 | 28,3 | 0,12 | 14,6 | 18,4 | < 0,05 | 0,018 | 346 |
| | 0,2–1,0 | 7,5 | 2 | Ci | < 0,0001 | 26,8 | 12 | < 0,05 | 16,6 | 13,1 | < 0,05 | 0,007 | 131 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 10,4 | 7,5 | < 0,05 | 2 | 5,8 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 6 | 0–0,2 | 7,8 | 3 | Ci | < 0,0001 | 36,5 | 28,3 | 0,11 | 15 | 18,3 | < 0,05 | 0,016 | 335 |
| | 0,2–1,0 | 7,6 | 2 | Ci | < 0,0001 | 27,6 | 12,6 | < 0,05 | 17,1 | 11,2 | < 0,05 | 0,01 | 133 |
| | 1,0–2,0 | 7,3 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 9,5 | 6,6 | < 0,05 | 3,6 | 7,3 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 7 | 0–0,2 | 7,7 | 3 | Ci | < 0,0001 | 32,1 | 23,8 | 0,13 | 13,6 | 19 | < 0,05 | 0,018 | 369 |
| | 0,2–1,0 | 7,5 | 2 | Ci | < 0,0001 | 26,8 | 13,3 | < 0,05 | 18,5 | 12,4 | < 0,05 | 0,008 | 154 |
| | 1,0–2,0 | 7,3 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 9,6 | 5,9 | < 0,05 | 3,2 | 7 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 8 | 0–0,2 | 7,7 | 3 | Ci | < 0,0001 | 45,3 | 23,5 | 0,13 | 15,2 | 19,1 | < 0,05 | 0,016 | 433 |
| | 0,2–1,0 | 7,7 | 2 | Ci | < 0,0001 | 27,9 | 12,4 | < 0,05 | 14,5 | 16,1 | < 0,05 | 0,01 | 142 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 7,0 | 8,4 | < 0,05 | 2,6 | 7,2 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 9 | 0–0,2 | 7,7 | 3 | Ci | < 0,0001 | 44,4 | 28,5 | 0,13 | 13,5 | 23,5 | < 0,05 | 0,017 | 362 |
| | 0,2–1,0 | 7,7 | 2 | Ci | < 0,0001 | 23,8 | 12,9 | < 0,05 | 13,9 | 19,3 | < 0,05 | 0,01 | 164 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 7,7 | 9,1 | < 0,05 | 2,2 | 13,2 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 10 | 0–0,2 | 7,8 | 3 | Ci | < 0,0001 | 55,6 | 24,6 | 0,14 | 13,2 | 19,3 | < 0,05 | 0,015 | 357 |
| | 0,2–1,0 | 7,6 | 2 | Ci | < 0,0001 | 22,7 | 13,6 | < 0,05 | 18,5 | 10,9 | < 0,05 | 0,004 | 154 |
| | 1,0–2,0 | 7,3 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 8,7 | 7,3 | < 0,05 | 3,2 | 5,9 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 11 | 0–0,2 | 7,9 | 3 | Ci | < 0,0001 | 50,8 | 29,3 | 0,1 | 14,2 | 19,2 | < 0,05 | 0,016 | 362 |
| | 0,2–1,0 | 7,5 | 2 | Ci | < 0,0001 | 24,3 | 13,5 | < 0,05 | 14 | 13,7 | < 0,05 | 0,005 | 146 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 11,4 | 9 | < 0,05 | 3,8 | 5,6 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 12 | 0–0,2 | 7,9 | 3 | Ci | < 0,0001 | 57,0 | 28,4 | 0,1 | 14,8 | 19,3 | < 0,05 | 0,013 | 421 |
| | 0,2–1,0 | 7,5 | 2 | Ci | < 0,0001 | 26,0 | 13,9 | < 0,05 | 16,2 | 10,9 | < 0,05 | 0,006 | 142 |
| | 1,0–2,0 | 7,3 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 7,4 | 5 | < 0,05 | 2,1 | 6,8 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |

| Значение ПДК (ОДК) для супесей [4], мг/кг: | | | | | 2,10 | 55 | 33 | 0,50 | 32 | 20 | 2 | 0,02 | — |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Фоновое значение [7], мг/кг: | | | | | — | 67,6 | 37,9 | 0,52 | 23,3 | 7,2 | — | — | — |
| Точка отбора проб | Глубина отбора, м/тип почв | pH, ед. pH | Zc | Содержание в пробе, мг/кг | Hg | Zn | Cu | Cd | Pb | Ni | As | БП* | НП** |
| 13 | 0–0,2 | 7,8 | 3 | Ci | < 0,0001 | 41,2 | 26,1 | 0,12 | 12,9 | 18,4 | < 0,05 | 0,016 | 419 |
| | 0,2–1,0 | 7,7 | 2 | Ci | < 0,0001 | 29,5 | 12,5 | < 0,05 | 14 | 15,9 | < 0,05 | 0,005 | 145 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 11,9 | 9,2 | < 0,05 | 2,7 | 5,1 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |
| 14 | 0–0,2 | 7,7 | 3 | Ci | < 0,0001 | 34,6 | 25,6 | 0,11 | 13,1 | 18,5 | < 0,05 | 0,015 | 330 |
| | 0,2–1,0 | 7,6 | 2 | Ci | < 0,0001 | 29,5 | 12,1 | < 0,05 | 16,7 | 14,7 | < 0,05 | 0,01 | 145 |
| | 1,0–2,0 | 7,2 | < 1 | Ci | < 0,0001 | 8,7 | 9 | < 0,05 | 3,2 | 5 | < 0,05 | < 0,005 | < 50 |

БП* — бенз(а)пирен

НП** — нефтепродукты

ТАБЛИЦА 2. Категория загрязненности в соответствии с СанПиН 2.1.3684—21. Правила дальнейшего использования в соответствии с СанПиН 2.1.3685—21

| Номер точки отбора | Глубина, м | Превышения над уровнем ПДК/ОДК тяжелых металлов | Превышения над уровнем фоновых концентрация более чем в 2 раза | Zc | Наличие превышения по содержанию бенз(а)пирена | Правила использования | Степень химической загрязненности |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1–14 | 0,0–0,2 | — | — | 3 | — | Использование без ограничений | Допустимая |
| | 0,2–1,0 | — | — | 2 | — | Использование без ограничений | Допустимая |
| | 1,0–2,0 | — | — | < 1 | — | Использование без ограничений | Допустимая |

ТАБЛИЦА 3. Оценка загрязнения грунтов нефтепродуктами

| Содержание С, мг/кг | Уровень загрязнения |
|---|---|
| < 1000 мг | Допустимая |
| 1000–2000 | Низкий |
| 2000–3000 | Средний |
| 3000–5000 | Высокий |
| > 5000 | Очень высокий |

Концентрация нефтепродуктов в пробах почвы, отобранных на участке изысканий, варьируется в пределах от < 50 до 421 мг/кг, что соответствует допустимому уровню загрязнения.

Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемые грунты по всем показателям соответствуют требованиям нормативной документации и могут быть использованы без ограничений при строительстве участка железнодорожного пути для необщего пользования.

## Библиографический список

1. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Свод правил.

2. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2021 г. № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений”, и о признании утратившим

силу постановления Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 г. № 985».

3. СП 11-102—97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Свод правил.

4. СанПиН 2.1.3684—21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Санитарные правила и нормы.

5. СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. Свод правил.

6. Письмо Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации «Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами (утв. Роскомземом 10 ноября 1993 г. и Минприроды РФ 18 ноября 1993 г.)».

7. Федорец Н. Г. Тяжелые металлы в почвах Карелии / Н. Г. Федорец, О. Н. Бахмет, М. В. Медведева и др. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. — 222 с.

8. Харламова А. В. Влияние эдафических условий рекультивированных породных отвалов на эффективность снижения их негативного воздействия на прилегающие территории / А. В. Харламова, Е. И. Верех-Белоусова // Безопасность жизнедеятельности. — 2018. — № 10(214). — С. 29–35.

9. Зубова Л. Г. Эдафические условия рекультивированных терриконов / Л. Г. Зубова, А. В. Харламова // Агроекологічний журнал. — 2012. — № 1. — С. 41–47.

10. Мироненко О. В. Гигиеническая оценка воздействия выбросов из тела полигона для складирования осадков сточных вод на здоровье населения / О. В. Мироненко, А. В. Киселев, Х. К. Магомедов и др. // Экология человека. — 2020. — № 11. — С. 4–13. — DOI: 10.33396/1728-0869-2020-11-4-13.

Дата поступления: 12.05.2023
Решение о публикации: 30.05.2023

**Контактная информация:**
ГОРБУНОВА Наталья Александровна — аспирант
ФЕДОСЕЕНКО Анастасия Алексеевна — канд. хим. наук, доц.; aa.fedoseenko@mail.ru
АБУ-ХАСАН Махмуд Самиевич — д-р техн. наук, проф.

## Ecological Assessment of Environmental Objects During Engineering and Environmental Surveys

### N. A. Gorbunova, A. A. Fedoseenko, M. S. Abu–Khasan

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

**For citation:** Gorbunova N. A., Fedoseenko A. A., Abu-Khasan M. S. Ecological Assessment of Environmental Objects During Engineering and Environmental Surveys // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 441–447. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-441-447

**Summary**
**Purpose:** To assess the current ecological condition of the survey site located in the Republic of Karelia and intended for laying a non-public railway track. To analyze the component of the environment — the soil, for compliance with the requirements of regulatory documentation. To establish the category of soil pollution in accordance with Sanitary and Epidemiological Standards and Regulations SanPiN 2.1.3684 and the rules for further use in accordance with SanPiN 2.1.3685. **Methods:** To assess the degree of soil contamination with heavy metals and organic ecotoxicants, samples have been taken from 14 test sites. Assessment of the degree

of soil contamination with heavy metals and benz(a)pyrene has been carried out in accordance with SanPiN 1.2.3685. The assessment of the degree of contamination of soils with petroleum products has been carried out in accordance with a letter from the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. The assessment of the danger of soil pollution has been carried out according to several indicators (Tables 4.3–4.5 of SanPiN 2.1.3685):
–- a complex of metals for public health is made according to the indicator of total pollution (Zc);
–- the presence/absence of excess over the established maximum permissible concentrations (MPC) and approximately permissible concentrations (APC).
The pollution category is determined by the worst indicator. When establishing pollution categories worse than "permissible", recommendations have been developed for the further use of contaminated soils (Appendix No. 9 to SanPiN 2.1.3684). **Results:** As a result of the tests conducted, it was determined that the soil samples collected from the survey area for the construction of a non-public railway section comply with the soil pollution category of "Permissible" and, according to the rules of further usage, fall under the classification of "Unrestricted Use". **Practical Significance:** The investigated soils meet all the requirements of the regulatory documentation and can be used without restrictions for the construction of the non-public railway section.

**Keywords:** Ecological assessment of the current state, ecotoxicants, heavy metals, petroleum products, benz(a) pyrene, engineering and environmental surveys.

## References

1. *SP 47.13330.2016. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Svod pravil* [SP 47.13330.2016. Engineering surveys for construction. Set of rules]. (In Russian)

2. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 28 maya 2021 g. № 815 "Ob utverzhdenii perechnya natsional'nykh standartov i svodov pravil (chastey takikh standartov i svodov pravil), v rezul'tate primeneniya kotorykh na obyazatel'noy osnove obespechivaetsya soblyudenie trebovaniy Federal'nogo zakona "Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy", i o priznanii utrativshim silu postanovleniya Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 4 iyulya 2020 g. № 985"* [Decree of the Government of the Russian Federation of May 28, 2021 № 815 "On approval of the list of national standards and sets of rules (parts of such standards and sets of rules), as a result of which, on a mandatory basis, compliance with the requirements of the Federal Law "Technical Regulations on the Safety of Buildings and structures", and on repealing the Decree of the Government of the Russian Federation dated July 4, 2020 № 985"]. (In Russian)

3. *SP 11-102—97. Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. Svod pravil* [SP 11-102—97. Engineering and environmental surveys for construction. Set of rules]. (In Russian)

4. *SanPiN 2.1.3684—21. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k soderzhaniyu territoriy gorodskikh i sel'skikh poseleniy, k vodnym ob"ektam, pit'evoy vode i pit'evomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukhu, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy. Sanitarnye pravila i normy* [SanPiN 2.1.3684—21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures. Sanitary rules and regulations]. (In Russian)

5. *SP 502.1325800.2021. Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. Obshchie pravila proizvodstva rabot. Svod pravil* [SP 502.1325800.2021. Engineering and environmental surveys for construction. General rules for the production of works. Set of rules]. (In Russian)

6. *Pis'mo Ministerstva okhrany okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii "Poryadok opredeleniya razmerov ushcherba ot zagryazneniya zemel' khimicheskimi veshchestvami (utv. Roskomzemom 10 noyabrya 1993 g. i Minprirody RF 18 noyabrya 1993 g.)"*

[Letter from the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation "The procedure for determining the amount of damage from land pollution with chemicals (approved by Roskomzem on November 10, 1993 and the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation on November 18, 1993)"]. (In Russian)

7. Fedorets N. G., Bakhmet O. N., Medvedeva M. V. et al. *Tyazhelye metally v pochvakh Karelii* [Heavy metals in the soils of Karelia]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2015, 222 p. (In Russian)

8. Kharlamova A. V., Verekh-Belousova E. I. Vliyanie edaficheskikh usloviy rekul'tivirovannykh porodnykh otvalov na effektivnost' snizheniya ikh negativnogo vozdeystviya na prilegayushchie territorii [Influence of edaphic conditions of reclaimed rock dumps on the effectiveness of reducing their negative impact on adjacent territories]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2018, Iss. 10(214), pp. 29–35. (In Russian)

9. Zubova L. G., Kharlamova A. V. Edaficheskie usloviya rekul'tivirovannykh terrikonov [Edaphic conditions of reclaimed waste heaps]. *Agroekologichniy zhurnal* [Agroecological journal]. 2012, Iss. 1, pp. 41–47. (In Russian)

10. Mironenko O. V., Kiselev A. V., Magomedov Kh. K. et al. Gigienicheskaya otsenka vozdeystviya vybrosov iz tela poligona dlya skladirovaniya osadkov stochnykh vod na zdorov'e naseleniya [Hygienic assessment of the impact of emissions from the body of a landfill for storing sewage sludge on public health]. *Ekologiya cheloveka* [Human ecology]. 2020, Iss. 11, pp. 4–13. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-11-4-13. (In Russian)

Received: May 12, 2023
Accepted: May 30, 2023

**Author's information:**
Natalia A. GORBUNOVA — Postgraduate Student
Anastasia A. FEDOSEENKO — PhD in Chemistry, Associate Professor; aa.fedoseenko@mail.ru
Makhmud S. ABU-KHASAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor

УДК 629.4.077-592

# Уточненная методика испытаний стояночного тормоза грузовых вагонов

**М. В. Зверев[1], А. А. Комайданов[1], А. Н. Смирнов[2]**

[1]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
[2]АО «НВЦ «Вагоны», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Семеновский, пр-кт Московский, 22, литера М, этаж 1, помещ. 5Н

**Для цитирования:** *Зверев М. В., Комайданов А. А., Смирнов А. Н.* Уточненная методика испытаний стояночного тормоза грузовых вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 448–456. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-448-456

## Аннотация

**Цель:** Описана уточненная методика испытаний стояночного тормоза грузовых вагонов, которая одновременно удовлетворяет требованиям двух нормативных документов: ГОСТ 26686—96, который устанавливает момент, приложенный к рукоятке (штурвалу) стояночного тормоза, не более 300 Н, при котором должно происходить удержание одиночного свободостоящего груженого вагона на уклоне не менее 30 ‰, и ГОСТ 34434—2018, который устанавливает расчетный (испытательный) момент силы, прикладываемый к штурвалу стояночного тормоза 100 Н · м. **Методы:** Производится поэтапная обработка результатов испытаний: первоначально определяются средние величины усилий прижатия и действительная сила нажатия на одну колодку. Затем рассчитываются коэффициент трения колодок о колесо и максимальный уклон пути, на котором железнодорожный подвижной состав удерживается стояночным тормозом. В основу решения поставленной задачи положен метод итерации, который необходимо применить дважды: на первом этапе с целью нахождения величины суммарной силы нажатия тормозных колодок от действия стояночного тормоза при учете максимального уклона пути, на котором железнодорожный состав удерживается стояночным тормозом, будет равен 30 ‰, после чего на втором этапе выбирается такое значение момента на валу привода стояночного тормоза, чтобы значение требуемой силы нажатия тормозных колодок от действия стояночного тормоза получилось таким же, как при максимальном уклоне пути $i_д$ = 30 ‰, после чего производится оценка полученных результатов и их сравнение с нормативными значениями. **Результаты:** Разработана уточненная методика испытаний стояночного тормоза грузовых вагонов. **Практическая значимость:** Применение данной методики позволит учитывать требования двух нормативных документов одновременно, предотвратив их противоречие.

**Ключевые слова:** Испытания вагонов, стояночный тормоз, удержание стояночным тормозом, тормозная рычажная передача, расчет тормоза вагона.

## Введение

Ключевым вопросом при осуществлении перевозок грузов и пассажиров железнодорожным транспортом является обеспечение безопасности движения поездов. На обеспечение безопасности движения поездов направлен целый комплекс мер, который включает в себя как нормативные документы, так и работу с персоналом, отвечающим за движение поездов. Пути совершенствования тормозных систем рассматривались в работах [1–6], но вопросы, связанные с испытаниями и работой стояночного тормоза, не были затронуты. Одним

из основных документов, который неразрывно связан с обеспечением безопасности на магистральных путях общего пользования, являются Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 23 июня 2022 г. № 250 (ПТЭ). Данный документ направлен на обеспечение взаимодействия между всеми структурами железных дорог, а также устанавливает требования к тормозному оборудованию единиц подвижного состава [7, 8].

На сегодняшний день в соответствии с ГОСТ 34434—2018 [9] грузовые вагоны должны быть оборудованы автоматическим пневматическим фрикционным тормозом и стояночным тормозом с ручным или автоматическим приводом. Допускается оборудование электропневматическим тормозом. ГОСТ 32880—2014 [10] устанавливает определение стояночного тормоза как устройство с ручным или автоматическим приводом, расположенное на единице железнодорожного подвижного состава и предназначенное для ее удержания на стоянке от самопроизвольного ухода, а также для принудительной аварийной остановки при наличии ручного или автоматического привода внутри единицы железнодорожного подвижного состава.

При разработке и проектировании новых вагонов и постановке их на производство возникает необходимость в проведении испытаний по проверке тормоза на вагоне.

Обзор нормативных документов, применяемых при проектировании вагонов

В настоящее время требования к стояночному тормозу содержатся как в отдельных руководящих документах, таких как ГОСТ 34434 [9], ГОСТ 32880—2014 [10] и ГОСТ 33597 [11], так и в государственных стандартах, относящихся к конкретным типам вагонов.

Рассмотрим государственные стандарты, относящиеся к определенному типу вагонов: ГОСТ 26725—97 [12] устанавливает требования к четырехосным универсальным полувагонам. Пункт 4.13 содержит требования по установке рамы вагона, его боковых и торцевых стен, дверей, требования к оборудованию вагона тележками двухосными, ударно-тяговыми устройствами, автоматическим тормозом с соответствующими приборами торможения и информацию об обязательном оборудовании полувагонов стояночным тормозом.

К вагонам-цистернам также предъявляются требования в соответствии с ГОСТ 51659 [13], пункт 4.1.3 которого устанавливает обязательное оборудование вагонов-цистерн следующими основными узлами: котел, узлы крепления котла цистерны (фасонные лапы, лежни и их опоры, шпангоуты), платформа, ходовые части и автосцепные устройства, тормозная рычажная передача, включающая в себя стояночный тормоз. Кроме того, пункт 5.5 устанавливает усилие (не более 300 Н), прикладываемое к стояночному тормозу (штурвалу или рукоятке) вагона-цистерны, с целью его удержания на уклоне величиной 0,03.

В соответствии с ГОСТ 30.243.1 [14] и ГОСТ 5973 [15] вагоны бункерного типа и вагоны-думпкары по аналогии с цистернами и полувагонами оборудуются стояночным тормозом.

Рассмотренные ранее нормативные документы на определенный тип вагона говорят лишь о необходимости установки стояночного тормоза, но не предъявляют никаких требований к нему. В качестве основного документа при проектировании и расчете стояночного тормоза вагона используется ГОСТ 32880 [10], который устанавливает определение стояночного тормоза, как некоторое устройство с приводом, установленное на единице подвижного состава и предназначенное для предотвращения самопроизвольного ухода во время стоянки или для экстренной (аварийной) остановки единицы подвижного состава.

Таким образом, обобщая требования для всех грузовых вагонов в части стояночного тормоза, при разработке и проектировании новых единиц

Рис. 1. Общий вид испытуемого вагона-платформы

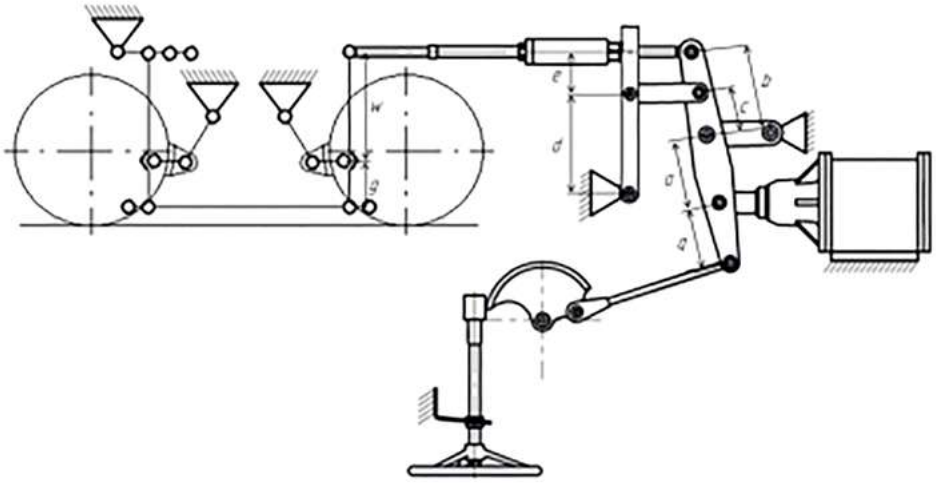


Рис. 2. Схема установленной тормозной рычажной передачи на вагоне

подвижного состава одновременно необходимо учитывать требования нескольких нормативных документов.

## Постановка задачи

В качестве требований для расчета стояночного тормоза вагона-платформы и при проведении испытаний применяются следующие нормативные документы:

– ГОСТ 26686—96 [16] содержит требование к стояночному тормозу, который должен удерживать одиночный груженый вагон на уклоне 30 ‰, при этом затормаживание должно осуществляться усилием, приложенным к рукоятке (штурвалу), не более 300 Н. Конструкция стояночного тормоза должна исключать его самопроизвольный отпуск;

– ГОСТ 34434—2018 [9] устанавливает расчетный (испытательный) момент силы, прикладываемый к штурвалу стояночного тормоза $M = 100$ Н · м.

Исходя из вышеупомянутых документов, установленное максимальное нормативное усилие, прикладываемое к рукояти стояночного тормоза, составляет 300 Н и задаваемый в испытаниях и расчетах стояночного тормоза крутящий момент, создаваемый динамометрическим ключом 100 Н · м.

В классическом понимании крутящего момента как произведения силы на плечо, при типовой конструкции штурвала привода стояночного тормоза радиусом 0,22 м, сравнение крутящих моментов на первый взгляд выявляет превышение максимального нормативного усилия на рукояти стояночного тормоза (0,22 м · 300 Н = = 66 Н · м ≤ 100 Н · м).

На самом же деле штурвал приводят во вращение двумя руками, и крутящий момент создается парой сил (100 Н · м / 0,22 м) / 2 = 227 Н ≤ 300 Н), но все же проблема отсутствия метода определения усилия на штурвале при удержании вагона на нормируемом уклоне остается нерешенной.

Таким образом, при проведении испытаний по проверке тормоза на вагонах-платформах возникает проблема с одновременным применением двух нормативных документов [17].

**Решение**

Для решения данной проблемы предложена следующая методика обработки результатов испытаний по проверке тормоза на вагоне или стационарные испытания тормоза (для апробации был выбран вагон-платформа. Общий вид и схема тормозной передачи испытуемого вагона-платформы представлены на рис. 1 и 2 соответственно).

Первоначально определяются средние величины усилий прижатия и действительная сила нажатия, приходящаяся на одну колодку. Затем рассчитывается коэффициент трения колодок о колесо и максимальный уклон пути, на котором обеспечивается удержание железнодорожного подвижного состава стояночным тормозом. Затем необходимо дважды применить метод итерации (далее подробно изложенный в работе), после чего производится оценка полученных результатов и их сравнение с нормативными значениями.

Основные технические характеристики испытуемого вагона-платформы представлены в табл. 1.

В табл. 2 представлены измеренные в ходе испытаний и полученные средние величины усилий прижатия колодок к колесам, при приложении к штурвалу стояночного тормоза вагона момент 100 Н · м с полноразмерными и изношенными колодками.

Действительная сила нажатия, приходящаяся на одну тормозную композиционную колодку $K_д$, определялась в соответствии с ГОСТ 34434—2018 по формуле (1) и составила 28,14 кН для полноразмерных колодок и 21,73 кН для изношенных.

$$K_д = \frac{\sum K_д}{m_к}, \quad (1)$$

где $K_д$ — действительная сила нажатия, приходящаяся на одну тормозную колодку, кН;

$\sum K_д$ — суммарная сила нажатия тормозных композиционных колодок от действия стояночного тормоза, кН;

ТАБЛИЦА 1. Основные технические характеристики испытуемого вагона

| Наименование параметра | Значение параметра |
|---|---|
| Грузоподъемность, т | 72 |
| Масса тары, т | 21,5 |
| Количество осей, шт. | 4 |
| Статическая осевая нагрузка, тс/ось | 23,5 |
| Длина вагона, мм:<br>– по осям сцепления автосцепок;<br>– по концевым балкам рамы | <br>25 470<br>24 250 |
| База вагона, мм | 19 000 |

ТАБЛИЦА 2. Усилия нажатия колодок, полученные при испытаниях

| № замера | Ось 1, кН | | Ось 2, кН | |
|---|---|---|---|---|
| | Датчик № 1 | Датчик № 2 | Датчик № 3 | Датчик № 4 |
| Полноразмерные колодки | | | | |
| 1 | 28,42 | 28,29 | 27,94 | 28,06 |
| 2 | 28,24 | 27,99 | 28,03 | 28,17 |
| 3 | 28,28 | 28,16 | 27,98 | 28,09 |
| ∑ | 28,31 | 28,15 | 27,98 | 28,11 |
| Изношенные колодки | | | | |
| 1 | 20,71 | 22,30 | 21,42 | 22,54 |
| 2 | 20,87 | 22,12 | 21,56 | 22,38 |
| 3 | 20,90 | 22,19 | 21,18 | 22,61 |
| ∑ | 20,83 | 22,20 | 21,39 | 22,51 |

$m_к$ — число колодок, действующих от механизма стояночного тормоза, $m_к = 4$.

По результатам проведенных испытаний был определен действительный статический коэффициент трения композиционной колодки о колесо $\varphi_{кс}$ по формуле (2):

$$\varphi_{кс} = 0,44 \cdot \frac{0,1K_д + 20}{0,4K_д + 20}, \quad (2)$$

где $\varphi_{кс}$ — действительный статический коэффициент трения композиционной колодки о колесо.

После этого в соответствии с ГОСТ 32880—2014 [10] определялся максимальный уклон пути, на котором обеспечивается удержание железнодорожного подвижного состава стояночным

ТАБЛИЦА 3. Результаты обработки

| Параметр | Полноразмерные колодки | Изношенные колодки |
|---|---|---|
| $\sum K_д$, кН | 112,6 | 86,93 |
| $K_д$, кН | 28,14 | 21,73 |
| $\varphi_{кс}$ | 0,32 | 0,34 |
| $i_д$, ‰ | 39,41 | 32,22 |

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета методом итерации для полноразмерных колодок

| Значение, по которому ведется подбор | | Подобранное значение | |
|---|---|---|---|
| Параметр | Значение параметра | Параметр | Значение параметра |
| Первый этап | | | |
| $\sum K_д$, кН | 86,00 | $i_д$, ‰ | 30,11 |
| Второй этап | | | |
| $M$, Н · м | 51,6 | $\sum K_д$, кН | 86,03 |

ТАБЛИЦА 5. Результаты расчета методом итерации для изношенных колодок

| Значение, по которому ведется подбор | | Подобранное значение | |
|---|---|---|---|
| Параметр | Значение параметра | Параметр | Значение параметра |
| Первый этап | | | |
| $\sum K_д$, кН | 81,00 | $i_д$, ‰ | 30,03 |
| Второй этап | | | |
| $M$, Н · м | 48,85 | $\sum K_д$, кН | 81,03 |

тормозом $i_д$, ‰ по выражению (3) при значении момента, прикладываемого к штурвалу стояночного тормоза $M$ = 100 Н · м [18]:

$$i_д = 1000 \cdot \frac{\sum K_д \cdot \varphi_{кс}}{T + Q}, \quad (3)$$

где $i_д$ — максимальный уклон пути, на котором обеспечивается удержание железнодорожного состава стояночным тормозом, ‰;

$T$ — масса тары испытуемой единицы железнодорожного подвижного состава, т;

$Q$ — грузоподъемность испытуемой единицы железнодорожного подвижного состава, т.

Таким образом, используя выражения (1–3), были получены необходимые данные для дальнейшей обработки результатов. Полученные значения результатов обработки представлены в табл. 3.

Особенность предложенной методики обработки результатов заключается в применении метода итерации в два этапа. На первом этапе с целью нахождения величины суммарной силы нажатия тормозных колодок от действия стояночного тормоза $\sum K_д$ по зависимости (3) при соблюдении условия, что максимальный уклон пути, на котором железнодорожный состав удерживается стояночным тормозом, будет равен 30 ‰.

Определив на первом этапе значение требуемой силы нажатия тормозных колодок от действия стояночного тормоза $\sum K_д$, на втором этапе выбирается значение момента на валу привода стояночного тормоза $M$ по зависимости (4), чтобы значение требуемой силы нажатия тормозных колодок от действия стояночного тормоза $\sum K_д$ получилось таким же, как при максимальном уклоне пути $i_д$ = 30 ‰. Подбор значений при итерациях ведется с точностью до второго десятичного знака.

$$\sum K_д = \frac{1}{1000} \cdot \left( \frac{M}{L} \cdot n_{чп} \cdot n_{рп.ст} \cdot n_{ст} - F_1 - F_2 \right) \times \times n \cdot n_п, \quad (4)$$

где $L$ — измеренное фактическое расстояние от середины крепления тяги до оси сектора, м (для испытуемого объекта $L$ = 0,087 м);

$n_{чп}$ — передаточное отношение червячной передачи (для испытуемого объекта $n_{чп}$ = 82);

$n_{рп.ст}$ — передаточное число стояночного тормоза от сектора до штока тормозного цилиндра (для испытуемого объекта $n_{рп.ст}$ = 1,85);

$n_{ст}$ — коэффициент полезного действия стояночного тормоза (для испытуемого объекта $n_{ст}$ = 0,2);

$F_1$ — усилие отпускной пружины тормозного цилиндра (для испытуемого объекта $F_1$ = = 1,03 кН);

$F_2$ — усилие пружины авторегулятора тормозной рычажной передачи, приведенное к штоку тормозного цилиндра (для испытуемого объекта $F_2$ = 0,44 кН).

Результаты обработки с применением метода итерации представлены в табл. 4 и 5 для полноразмерных и изношенных колодок соответственно.

## Заключение

Полученные значения усилий, прикладываемых к штурвалу стояночного тормоза при проведении испытаний с учетом того, что на штурвал действует момент пары сил, не превышают нормативного значения 300 Н при выполнении условия по обеспечению удержания опытной единицы подвижного состава стояночным тормозом на уклоне 30‰ с полноразмерными и изношенными колодками.

Таким образом, предложенная методика расчетно-экспериментального определения максимального усилия, приложенного к рукоятке (штурвалу), позволяет, используя требования стандартов к методам испытаний и расчету стояночного тормоза, произвести оценку показателя при отсутствии в действующих стандартах метода.

## Библиографический список

1. Артамонов Е. И. Тормозные системы, интегрированные в тележку грузовых вагонов / Е. И. Артамонов, А. Л. Ковязин, А. М. Орлова и др. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2018. — № 6(79).

2. Донченко А. В. Расчетные исследования по улучшению тормозной эффективности грузового вагона с раздельным торможением тележек / А. В. Донченко, Ю. Я. Водянников, А. М. Сафронов и др. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2009. — № 29.

3. Старостин С. С. Новые подходы к проектированию инновационных тормозных систем вагонов / С. С. Старостин, Е. С. Сипягин // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2014. — № 3(52).

4. Пшинько А. Н. Усовершенствование методов оценки эффективности тормозов вагонов / А. Н. Пшинько, С. В. Мямлин, В. И. Приходько и др. // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2005. — № 7.

5. Гущин П. А. О путях совершенствования тормозной системы грузовых вагонов / П. А. Гущин, Р. А. Лысцев, Я. Д. Подлесников // Евразийский Союз Ученых. — 2015. — № 3-4(12).

6. Крон И. Р. Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению подвижного состава с применением цифровых моделей / И. Р. Крон, Б. О. Поляков // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 4(95). — С. 50–53.

7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 23 июня 2022 г. № 250.

8. Смольянинов П. В. Обоснование пути повышения надежности тормозной системы грузовых вагонов / П. В. Смольянинов, В. С. Смольянинов, В. А. Четвергов // Известия Транссиба. — 2012. — № 1(9).

9. ГОСТ 34434—2018. Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета (с поправкой). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2018.

10. ГОСТ 32880—2014. Тормоз стояночный железнодорожного подвижного состава. Технические условия (Переиздание). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2019.

11. ГОСТ 33597—2015. Тормозные системы железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний (переиздание с поправкой). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2019.

12. ГОСТ 26725—97. Полувагоны четырехосные универсальные магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Официальное издание. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.

13. ГОСТ Р 51659—2000. Вагоны-цистерны магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Официальное издание. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.

14. ГОСТ 9.030—74. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред (с изменениями № 1–4). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2008.

15. ГОСТ 5973—2009. Вагоны-самосвалы (думпкары) железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия (Переиздание). Официальное издание. — М.: Стандартинформ, 2019.

16. ГОСТ 26686—96. Вагоны-платформы магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. Официальное издание. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1997.

17. Клюка В. П. Оценка обеспечения удержания стояночным тормозом на нормированном уклоне инновационного полувагона с нагрузкой 27 т от колесной пары на рельс / В. П. Клюка, П. Б. Сергеев, С. А. Мосол // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 2(62).

18. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества (протокол от 6–7 мая 2017 № 60).

Дата поступления: 05.03.2023
Решение о публикации: 25.04.2023

**Контактная информация:**
ЗВЕРЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, доц.; zverev-nvc@yandex.ru
КОМАЙДАНОВ Алексей Андреевич — аспирант; komaidanovnvc@yandex.ru
СМИРНОВ Анатолий Николаевич — начальник испытательного центра; smirnovnvc@mail.ru

## Refined Test Procedure for the Parking Brake of Freight Cars

**M. V. Zverev[1], A. A. Komaidanov[1], A. N. Smirnov[2]**

[1]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation
[2] AO “NVTS “Vagony”, St. Petersburg, 190013, Russian Federation, intra-urban terr. municipal district Semenovsky, 22, Moskovsky pr., letter M, floor 1, room 5N

**For citation:** Zverev M. V., Komaidanov A. A., Smirnov A. N. Refined Test Procedure for the Parking Brake of Freight Cars // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 448–456. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-448-456

**Purpose:** A refined test procedure for the parking brake of freight cars is described, which simultaneously satisfies the requirements of two regulatory documents: GOST 26686-96, which establishes the moment applied to the handle (steering wheel) of the parking brake, not more than 300 N, at which a single free-standing loaded car on a slope of at least 30‰ must be retained, and GOST 34434-2018, which sets the design (test) moment of force applied to the parking brake handle at 100 N·m. **Methods:** Stage-by-stage processing of test results is carried out: initially, the average values of pressing force and the actual pressing force on a single brake block is determined. Then the coefficient of friction between the blocks and the wheel and the maximum slope of the track, on which the railway rolling stock is retained by the parking brake, are calculated. The solution of the problem is based on the iteration method, which must be applied twice: at the first stage, in order to find the value of the total pressing force on the brake blocks from the action of the parking brake, taking into account that the maximum slope of the track, on which the train is retained by the parking brake,

equals 30‰, then at the second stage, such a value of the moment on the parking brake drive shaft is selected so that the value of the required pressing force on the brake blocks from the action of the parking brake is the same as with the maximum slope of the track $i_d$ = 30 ‰, after which the obtained results are evaluated and compared with the normative values. **Results:** An updated method for testing the parking brake of freight cars has been developed. **Practical significance:** The application of this technique will allow taking into account the requirements of two regulatory documents at the same time preventing their contradiction.

**Keywords:** Car testing, parking brake, retention by the parking brake, brake linkage, car brake calculation.

## References

1. Artamonov E. I., Kovyazin A. L., Orlova A. M. et al. Tormoznye sistemy, integrirovannye v telezhku gruzovykh vagonov [Brake systems integrated into a freight car bogie]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics]. 2018, Iss. 6(79). (In Russian)

2. Donchenko A. V., VodyannikovYu. Ya., Safronov A. M. et al. Raschetnye issledovaniya po uluchsheniyu tormoznoy effektivnosti gruzovogo vagona s razdel'nym tormozheniem telezhek [Calculation studies to improve the braking efficiency of a freight car with separate braking of bogies]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Nauka i Progress Transporta. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]. 2009, Iss. 29. (In Russian)

3. Starostin S. S., Sipyagin E. S. Novye podkhody k proektirovaniyu innovatsionnykh tormoznykh sistem vagonov [New approaches to the design of innovative brake systems of cars]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics]. 2014, Iss. 3(52). (In Russian)

4. Pshin'ko A. N., Myamlin S. V., Prikhod'ko V. I. et al. Usovershenstvovanie metodov otsenki effektivnosti tormozov vagonov [Improving the methods for evaluating the efficiency of car brakes]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]. 2005, Iss. 7. (In Russian)

5. Gushchin P. A., LystsevR. A., Podlesnikov Ya. D. O putyakh sovershenstvovaniya tormoznoy sistemy gruzovykh vagonov [On ways to improve the brake system of freight cars ]. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh* [Eurasian Union of Scientists]. 2015, Iss. 3-4(12). (In Russian)

6. Kron I. R., Polyakov B. O. Raschetno-eksperimental'nyy metod opredeleniya osnovnogo soprotivleniya dvizheniyu podvizhnogo sostava s primeneniem tsifrovykh modeley [Calculation and experimental method for determining the main resistance to the movement of rolling stock using digital models]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2021, Iss. 4(95), pp. 50–53. (In Russian)

7. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii, utverzhdennye prikazom Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 23 iyunya 2022 g. № 250* [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation, approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 23, 2022 № 250]. (In Russian)

8. Smol'yaninov P. V., Smol'yaninovV. S., Chetvergov V. A. Obosnovanie puti povysheniya nadezhnosti tormoznoy sistemy gruzovykh vagonov [Substantiation of ways to improve the reliability of the brake system of freight cars]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. 2012, Iss. 1(9). (In Russian)

9. *GOST 34434—2018. Tormoznye sistemy gruzovykh zheleznodorozhnykh vagonov. Tekhnicheskie trebovaniya i pravila rascheta (s popravkoy). Ofitsial'noe izdanie* [GOST 34434—2018. Brake systems of freight railway cars. Technical requirements and calculation rules (as amended). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. (In Russian)

10. *GOST 32880—2014. Tormoz stoyanochnyy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie usloviya*

*(Pereizdanie). Ofitsial'noe izdanie* [GOST 32880—2014. Parking brake of railway rolling stock. Specifications (Reprint edition). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian)

11. *GOST 33597—2015. Tormoznye sistemy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody ispytaniy (pereizdanie s popravkoy). Ofitsial'noe izdanie* [GOST 33597—2015. Brake systems of railway rolling stock. Test Methods (Revised edition). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian)

12. *GOST 26725—97. Poluvagony chetyrekhosnye universal'nye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Ofitsial'noe izdanie* [GOST 26725—97. Four-axle universal gondola cars for 1520 mm gauge mainline railways. General specifications. Official publication]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 2004. (In Russian)

13. *GOST R 51659—2000. Vagony-tsisterny magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Ofitsial'noe izdanie* [GOST R 51659—2000. Tank cars of 1520 mm gauge mainline railways. General specifications. Official publication]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 2000. (In Russian)

14. *GOST 9.030—74. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya (ESZKS). Reziny. Metody ispytaniy na stoykost' v nenapryazhennom sostoyanii k vozdeystviyu zhidkikh agressivnykh sred (s izmeneniyami № 1–4). Ofitsial'noe izdanie* [GOST 9.030—74. Unified Corrosion and Aging Protection System (ESZKS). Rubber. Test methods for resistance in an unstressed state to the effects of liquid aggressive media (as amended № 1–4). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. (In Russian)

15. *GOST 5973—2009. Vagony-samosvaly (dumpkary) zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya (Pereizdanie). Ofitsial'noe izdanie* [GOST 5973—2009. Dump cars (dumpcars) of 1520 mm gauge railways. General Specifications (Reissue). Official publication]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian)

16. *GOST 26686—96. Vagony-platformy magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Ofitsial'noe izdanie* [GOST 26686—96. Platform cars of 1520 mm gauge mainline railways. General specifications. Official publication]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1997. (In Russian)

17. Klyuka V. P., Sergeev P. B., Mosol S. A. Otsenka obespecheniya uderzhaniya stoyanochnym tormozom na normirovannom uklone innovatsionnogo poluvagona s nagruzkoy 27 t ot kolesnoy pary na rel's [Evaluation of holding by a parking brake on a normalized slope of an innovative gondola car with a load of 27 tons from a wheelset on a rail]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, Iss. 2(62). (In Russian)

18. *Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Utverzhdeno Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva (protokol ot 6–7 maya 2017. № 60)* [Rules for the maintenance of brake equipment and control of the brakes of railway rolling stock. Approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (Minutes of May 6–7, 2017 № 60)]. (In Russian)

Received: March 05, 2023
Accepted: April 25, 2023

**Author's information:**
Mikhail V. ZVEREV — PhD in Engineering, Associate Professor; zverev-nvc@yandex.ru
Aleksey A. KOMAIDANOV — Postgraduate Student; komaidanovnvc@yandex.ru
Anatoly N. SMIRNOV — Head of the Testing Center; smirnovnvc@mail.ru

УДК 629.4.077 : 629.4.087

# Железнодорожный дисковый тормоз с термоизолированными узлами трения, содержащими материалы с различными фрикционными свойствами

**Д. С. Кривошея**

Донецкий институт железнодорожного транспорта, Донецкая Народная Республика, 283018, Донецк, ул. Горная, 6

**Для цитирования:** *Кривошея Д. С.* Железнодорожный дисковый тормоз с термоизолированными узлами трения, содержащими материалы с различными фрикционными свойствами // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 457–462. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-457-462

## Аннотация

**Цель:** Описание конструкции дискового тормоза с термоизолированными узлами трения и особенностей его изготовления. **Методы:** Анализ свойств фрикционных материалов для узлов трения железнодорожного дискового тормоза. **Результаты:** Предложена конструкция дискового тормоза с термоизолированными узлами трения, характерной особенностью которого является термоизоляция узлов трения А и В друг от друга. Кроме того, в узлах трения — тормозных дисках и тормозных накладках — используются разные фрикционные материалы. Основной принцип функционирования дискового тормоза заключается в компенсации силы трения узла трения А в условиях низких температур, в котором размещен фрикционный материал на основе углерода. Приведены особенности изготовления тормоза. Отмечается, что рекомендованным материалом для термоизолированных рабочих деталей дискового тормоза является хризотил-асбест. Этот материал имеет низкую теплопроводность и приемлемую стоимость. Клеевые соединения при термоизолировании тормозных дисков рекомендуется осуществлять на основе клея ABRO TM-185. **Практическая значимость:** Описаны конструкция и особенности изготовления дискового тормоза с термоизолированными узлами трения, а также определены наилучшие фрикционные материалы для него. Результаты исследования могут быть использованы в специализированных и локомотивостроительных предприятиях с целью устранения существующих недостатков, касающихся характеристик трения применяемых фрикционных материалов, а также сокращения издержек на изготовление дискового тормоза на основе углерода.

**Ключевые слова:** Дисковый тормоз, узел трения, термоизолирующий элемент, фрикционные материалы, коэффициент трения, углерод, асбест, теплопроводность, температура применения.

## Введение

В настоящее время еще не решен вопрос оптимального соотношения цены и конструктивных особенностей углеродного дискового тормоза для железнодорожного подвижного состава. Главный недостаток углеродного тормоза — его стоимость. Углерод является дорогим фрикционным материалом. Стоимость одного комплекта тормозного оборудования для автомобиля составляет до 16 тысяч евро [1], а технология его изготовления имеет продолжительность более 7 месяцев.

Кроме стоимости, еще одним недостатком углерода является низкий коэффициент трения в условиях холодного времени года, когда коэффициент трения становится на уровне 0,1 и ниже [2].

Одним из путей снижения стоимости углеродного тормоза является сокращение расхода углерода на единицу тормозного оборудования.

Такую возможность реализует дисковый тормоз с термоизолированными узлами трения при сохранении достаточно высоких тормозных качеств дискового тормоза.

**Описание конструкции нового тормоза**

Конструкция углеродного тормоза с двумя термоизолированными узлами трения, содержащими материалы с различными фрикционными свойствами, представлена на рис. 1 [3].

Тормозной диск *4* и тормозная накладка *2* образуют узел трения *A*. Тормозной диск *6* и тормозная накладка *3* образуют узел трения *B*. Узлы трения *A* и *B* изолированы между собой термоизоляционным элементом *5*. Тормозные диски *4* и *6* обладают разными фрикционными свойствами (изготовлены из разных материалов) и присоединяются к ступице с помощью болтового соединения, которое также термоизолируется.

Материалы для узлов трения *A* и *B* подбираются по принципу физической совместимости материалов [4], которая определяется по критериям максимального коэффициента трения и минимальной интенсивности изнашивания.

Главный принцип определения фрикционных материалов для узлов трения дискового тормоза состоит в следующем. Для одного узла трения (например, *A*) определяют углеродные фрикционные материалы, которые обладают высокими характеристиками трения при высоких рабочих температурах торможения (углерод), а для другого узла трения (*B*) — фрикционные материалы, имеющие высокие характеристики при более низких температурах (например, чугун, сталь и т. п.).

В условиях, когда рабочая температура узла трения может превысить уровень температуры, обусловленный природными свойствами материалов, предусмотрена возможность корректировать температуру (на стадии конструирования дискового тормоза) за счет коэффициента взаимного перекрытия согласно известной закономерности, по которой уменьшение коэффициента взаимного перекрытия приводит к соответствующему уменьшению температуры [5].

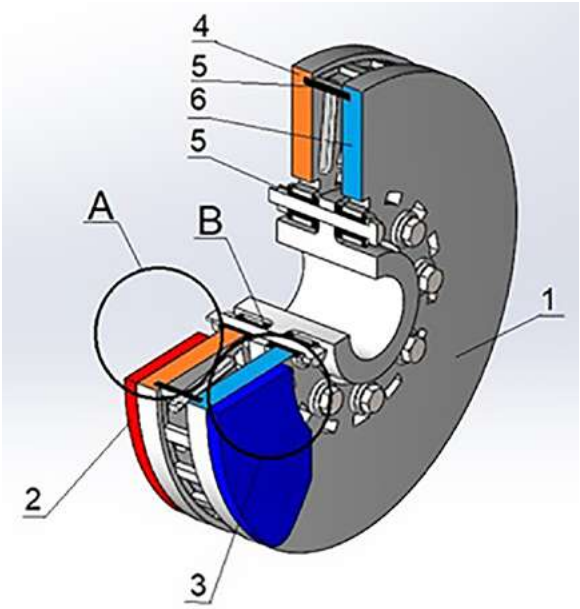



Рис. 1. Общий вид дискового тормоза с термоизолированными узлами трения, содержащими материалы с различными фрикционные свойства:
*A* — первый узел трения; *B* — второй узел трения; *1* — рабочая поверхность тормозного диска (узел трения *B*);
*2* — тормозная накладка (узел трения *A*);
*3* — тормозная накладка (узел трения *B*);
*4* — тормозной диск (узел трения *A*);
*5* — термоизоляционный элемент;
*6* — тормозной диск (узел трения *B*)

Дисковый тормоз работает следующим образом [3]. При торможении элементы узлов трения *A* и *B* начинают одновременно взаимодействовать. Узел трения *A*, сформированный из материалов на основе углерода, который обладает высокими характеристиками трения при высоких температурах (300 °C и более), работает в режиме разогрева и постепенно увеличивает силу трения. Узел трения *B*, сформированный из фрикционных материалов, обладающих высокими характеристиками трения при более низких температурах по сравнению с узлом трения *A*, реализует максимальную силу трения. При достижении

температуры 300 °С и выше наблюдается перераспределение участия узлов трения в процессе торможения. Узел трения *A* реализует максимальную силу трения при торможении, а узел трения *B* уменьшает свое участие в торможении, и поэтому дальнейший рост температуры замедляется и становится адекватной той части работы, которую выполняет узел трения *B*.

Предлагаемая конструкция и принцип определения фрикционных материалов дискового тормоза позволяют устранить недостатки фрикционных материалов на основе композиций из углерода, обладающих высокими характеристиками трения при торможении в условиях высоких температур (300–1000 °С), но имеющих неприемлемые значения при более низких температурах.

**Особенности изготовления нового тормоза**

При изготовлении дискового тормоза с термоизолированными узлами трения используются детали, широко применяющиеся в машиностроении. Исключением является тормозной диск на основе углерода, который изготавливается на специализированном предприятии.

Если фрикционный материал не обладает достаточной жесткостью для того, чтобы из него можно было изготовить тормозной диск, тогда по периметру тормозного диска прокладываются специальные элементы, которые обладают термоизоляционной способностью и достаточной механической прочностью. На рис. 2. представлен термоизолирующий элемент.

Определенную проблему представляет собой термоизолирование узлов трения. Высокая температура, которая реализуется при торможении подвижного состава (до 1000 и более °С), требует применения современных материалов. Термоизолирование внутренней вентилируемой поверхности дискового тормоза осуществляется за счет атмосферного воздуха. Поток воздуха, проходящий между тормозными дисками, термоизолирует их. В случае недостаточного термоизолирования на внутреннюю поверхность тормозного диска приклеивают слой термоизоляционного материала.

Теплоизолирование контактирующих поверхностей осуществляется за счет асбеста. Асбест относится к группе минералов неметаллического типа и является хорошим термоизоляционным материалом, широко применяющимся в машиностроении и строительстве. Асбест — это общее название ряда тонковолокнистых минералов из класса силикатов. Различают два вида основных асбестов: амфиболовый и хризотиловый [6].

Химическая формула амфибол-асбеста $(Na_2Fe_3^{2+}Fe_2^{3+})Si_8O_{22}(OH)_2$. Амфибол-асбест является кислостойким силикатом железа, канцерогеном, на субмикроуровне имеет форму острых иголок, которые, попадая в легкие, травмируют ткани и практически не выводятся из организма. Поэтому был принят запрет на использование амфибол-асбеста в машиностроении и строительстве. Строение амфибол-асбеста приведено на рис. 3 [6].

Химическая формула хризотил-асбеста $3MgO{\cdot}2SiO_2{\cdot}2H_2O$. Хризотил-асбест является сили-

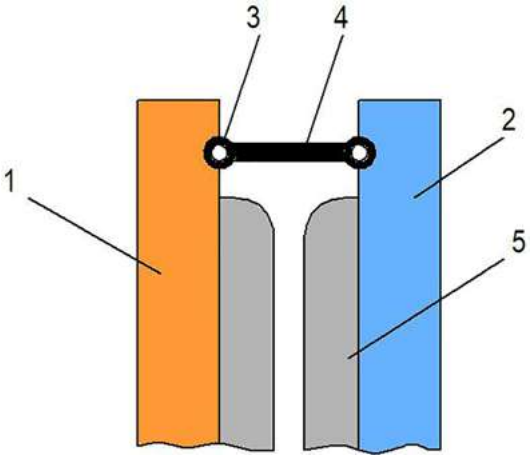



Рис. 2. Термоизолирующий элемент:
*1* — тормозной диск узла трения *A*;
*2* — тормозной диск узла трения *B*;
*3* — термоизоляционный слой;
*4* — термоизолирующий элемент;
*5* — направляющие для организации вентилирования внутренней полости тормоза

Рис. 3. Строение амфибол-асбеста на субмикроуровне

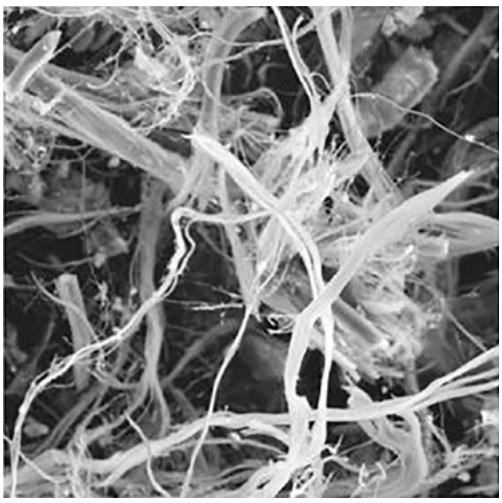


Рис. 4. Строение хризотил-асбеста на субмикроуровне

ТАБЛИЦА 1. Свойства лучших термоизолирующих материалов

| Наименование характеристики | Хризотил-асбест | isoGLAS 550 | isoTherm 800 | isoTherm 1000 |
|---|---|---|---|---|
| Наличие вредных веществ | + | – | – | – |
| Температура применения, °С | 1450–1500 | 550 | 800 | 1000-1050 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К) | 0,05–0,07 | 0,13 | 0,09 | 0,092 |
| Прочность на разрыв, Н | 3000 | 1300 | 3000 | 3200 |
| Масса 1 м$^2$ при толщине 1,8 мм | 1050 | 1050 | 1150 | 1180 |
| Потеря массы при прокаливании, % | 27,0 | 7,0 | 7,0 | 5,0 |
| Наличие горючих веществ | 13,5 | – | – | – |

катом магния и на субмикроуровне имеет форму мягких шелковистых волокон. Согласно последним исследованиям хризотил-асбест не наносит вред здоровью при контролируемом его использовании и выводится из организма в течение месяца. Строение хризотил-асбеста приведено на рис. 4 [6, 7].

Хризотил-асбест обладает минимальной теплопроводностью, высокой прочностью на разрыв волокон, не выделяет при нагревании опасных для организма человека веществ и, что не маловажно, имеет приемлемую стоимость. Хризотил-асбест является композиционным материалом: на 90 % он состоит из портландцемента и 10 % приходится на долю хризотил-асбеста.

В табл. 1 сведены свойства лучших по теплопроводности современных теплоизоляционных материалов [6–8].

Из приведенной таблицы следует, что лучшим термоизоляционным материалом является хризотил-асбест. По характеристикам теплопроводности и температуры применения этот материал не имеет себе равных. Однако по наличию относительно вредных и горючих веществ он уступает многим материалам.

Альтернативой применения хризотил-асбеста как термоизолирующего материала являются материалы на основе стекловолокна isoGLAS 550, isoTherm 800 и isoTherm 1000 производства немецкой фирмы Frenzelit [9, 10]. Эти материалы имеют различную температуру применения и теплопроводность, которая уступает хризотил-асбесту. Тем не менее материал isoTherm 1000 вполне может быть заменой хризотил-асбесту в дисковом тормозе с двумя термоизолированными узлами трения.

При сборке деталей дискового тормоза может быть применено клеевое соединение. В частности, для дополнительного термоизолирования тормозного диска с внутренней его стороны наклеивается слой термоизолирующего материала. Это соединение может быть осуществлено на основе клея ABRO TM-185 [10].

## Заключение

Предложена конструкция дискового тормоза с термоизолированными узлами трения. Дисковый тормоз обеспечивает компенсирование низкого коэффициента трения его рабочих элементов на основе углерода в условиях холодного времени года.

Характерной особенностью конструкции нового дискового тормоза является использование нескольких фрикционных материалов с различными фрикционными свойствами.

Предложено в качестве термоизоляционного материала использовать хризотил-асбест, который имеет самую низкую теплопроводность среди современных материалов и приемлемую стоимость.

## Библиографический список

1. Тормозные системы D2: Карбон-керамические. — 2013. — URL: https://b-fast.ru/shop/tormoznye-sistemy/karbon-keramicheskie/ (дата обращения: 17.02.2023).

2. Каковы преимущества карбоно-керамических тормозов? — 2015. — URL: https://auto.today/bok/4559-kakovy-preimuschestva-karbono-keramicheskih-tormozov-stoit-li-ih-pokupat.html (дата обращения: 17.02.2023).

3. Патент № 150103 Украина, МПК (2006): F16D 25/00. Дисковый тормоз: № u202105230: заявл. 15.09.2021: опубл. 29.12.2021 / Осенин Ю. И., Кривошея Д. С., Кривошея Ю. В. и др.

4. Крагельский И. В. Узлы трения машин: Справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.

5. Чичинадзе А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебн. для техн. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение. 2001. — 663 с.

6. Асбест. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Асбест (дата обращения: 18.02.2023)

7. Термостійкі технічні тканини з скловолокна — сучасна альтернатива асботканям ГОСТ 6102—78 // Економі інженерний центр. — URL: https://gasket.kiev.ua/ua/a339489-termostojkie-tehnicheskie-tkani.htmlссылка (дата обращения: 02.03.2023).

8. Insulation. Isolationsmaterialien. isotherm // Frenzelit. — URL: https://www.frenzelit.com/en/products/insulation/insulation-materials/isotherm (дата обращения: 02.03.2023).

9. Асбест: вред, свойства, характеристики, применение асбеста в Украине // Политех. Инженерная компания. — 2014. — URL: https://politeh.biz/ru/asbest-vred-svoystva-kharakteristiki-primenenie-asbesta-v-ukraine/ (дата обращения: 25.02.2023).

10. Термометалл ABRO // ABRO. — 2023, ООО «АБРО Индастрис». — URL: https://abro-ind.ru/catalog/auto/glue/item-2095/ (дата обращения: 03.03.2023).

Дата поступления: 29.03.2023
Решение о публикации: 19.04.2023

**Контактная информация:**
КРИВОШЕЯ Дарья Сергеевна — соискатель;
goncharova_ds@mail.ru

# Railway Disc Brake with Thermally Insulated Friction Assemblies Containing Materials with Different Friction Properties

**D. S. Krivosheya**

Donetsk Railway Transport Institute, 6, Gornaya st., Donetsk, 283018, Donetsk People's Republic

**For citation:** Krivosheya D. S. Railway Disc Brake with Thermally Insulated Friction Assemblies Containing Materials with Different Friction Properties // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 457–462. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-457-462

## Summary

**Purpose:** Description of the design of the disc brake with thermally insulated friction units and the peculiarities of its manufacture. **Methods:** Analysis of the properties of friction materials for friction units of the railway disc brake. **Results:** The design of disc brake with thermally insulated friction units is proposed, a characteristic feature of which is thermal insulation of friction units A and B from each other. In addition, different friction materials are used in friction units – brake discs and brake linings. The basic principle of the disc brake is to compensate for the friction force of the friction assembly A in low temperature conditions where the carbon-based friction material is placed. Features of brake manufacturing are given. It is noted that the recommended material for thermally insulated working parts of the disc brake is chrysotile-asbestos. This material has a low thermal conductivity and an acceptable cost. It is recommended to use adhesive joints based on ABRO TM-185 glue by thermal insulation of brake discs. **Practical significance:** The design and features of the manufacture of a disc brake with thermally insulated friction units are described, as well as the best friction materials for it are determined. The results of the study can be used in specialized and locomotive manufacturing enterprises in order to eliminate the existing drawbacks regarding the friction characteristics of the friction materials used, as well as to reduce the cost of manufacturing a carbon-based disc brake.

**Keywords:** Disc brake, friction unit, heat-insulating element, friction materials, friction coefficient, carbon, asbestos, thermal conductivity, application temperature.

## References

1. *Tormoznye sistemy D2: Karbon-keramicheskie* [Brake systems D2: Carbon-ceramic]. 2013. Available at: https://b-fast.ru/shop/tormoznye-sistemy/karbon-keramicheskie/ (accessed: February 17, 2023). (In Russian)

2. *Kakovy preimushchestva karbono-keramicheskikh tormozov?* [What are the benefits of carbon ceramic brakes?]. 2015. Available at: https://auto.today/bok/4559-kakovy-preimuschestva-karbono-keramicheskih-tormozov-stoit-li-ih-pokupat.html (accessed: February 17, 2023). (In Russian)

3. Osenin Yu. I., Krivosheya D. S., Krivosheya Yu. V. et al. *Diskovyy tormoz* [Disc brake]. Patent of Ukraine, no. u202105230, 2021. (In Ukrainian)

4. Kragel'skiy I. V., Mikhin N. M. *Uzly treniya mashin: Spravochnik* [Friction units of machines: a Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984, 280 p. (In Russian)

5. Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A. et al. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka): uchebn. dlya tekhn. vuzov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication): textbook. for tech. universities. 2nd ed., revised and additional]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001, 663 p. (In Russian)

6. *Asbest* [Asbestos]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Asbest (accessed: February 18, 2023). (In Russian)

7. Termostiyki tekhnichni tkanini z sklovolokna — suchasna al'ternativa asbotkanyam GOST 6102—78 [Heat-resistant technical fabrics from fiberglass — a modern alternative to asbestos fabrics GOST 6102—78]. *Ekonomi inzhenerniy tsentr* [Economy engineering center]. Available at: https://gasket.kiev.ua/ua/a339489-termostojkie-tehnicheskie-tkani.htmlssylka (accessed: March 02, 2023). (In Ukrainian)

8. Insulation. Isolationsmaterialien. isotherm. Frenzelit. Available at: https://www.frenzelit.com/en/products/insulation/insulation-materials/isotherm (accessed: March 02, 2023). (In German)

9. Asbest: vred, svoystva, kharakteristiki, primenenie asbesta v Ukraine [Asbestos: harm, properties, characteristics, use of asbestos in Ukraine]. *Politekh. Inzhenernaya kompaniya* [Polytech. Engineering company]. 2014. Available at: https://politeh.biz/ru/asbest-vred-svoystva-kharakteristiki-primenenie-asbesta-v-ukraine/ (accessed: February 25, 2023). (In Russian)

10. Termometall ABRO [Thermometal ABRO]. *ABRO* [ABRO]. 2023, OOO "ABRO Indastris". Available at: https://abro-ind.ru/catalog/auto/glue/item-2095/ (accessed: March 03, 2023). (In Russian)

Received: March 29, 2023
Accepted: April 19, 2023

**Author's information:**
Darya S. KRIVOSHEYA — Applicant;
goncharova_ds@mail.ru

УДК 621.314.6:004.942(045)

# Моделирование режима электрического торможения тепловоза с последовательным возбуждением коллекторных тяговых двигателей при использовании силового полупроводникового преобразователя

**В. Ю. Евсеев[1,2], А. Н. Савоськин[2]**

[1]Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, Российская Федерация, 140402, Московская область, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410
[2]Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9-9

**Для цитирования:** *Евсеев В. Ю., Савоськин А. Н.* Моделирование режима электрического торможения тепловоза с последовательным возбуждением коллекторных тяговых двигателей при использовании силового полупроводникового преобразователя // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 463–470. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-463-470

## Аннотация

**Цель:** Рассмотреть структуру, преимущества и принцип работы нового транзисторного преобразователя на *IGBT*-транзисторах для тепловозов с коллекторными тяговыми двигателями в режиме электрического торможения, а также особенности реализации данного режима на тепловозах. Показать функциональную структуру системы автоматического управления преобразователем для режима электрического торможения. Построить потенциально возможную тормозную характеристику тепловоза с новым преобразователем. **Методы:** Имитационное моделирование режима электрического торможения с помощью компьютерной математической модели тягового привода в среде *Matlab Simulink*. Анализ результатов моделирования работы тягового привода в стационарных и динамических режимах. Сравнение полученной тормозной характеристики с существующей для тепловоза 2ТЭ25КМ. **Результаты:** Установлено, что применение предлагаемого транзисторного тягового преобразователя в силовой электрической схеме тепловоза обеспечивает поосное управление коллекторным тяговым электроприводом в режиме электрического торможения с последовательным возбуждением тяговых двигателей и позволяет существенно повысить эффективность электрического тормоза на низких скоростях движения. Предлагаемое решение реализует заданную тормозную силу локомотива в широком диапазоне скоростей, а также ее ограничения, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза. **Практическая значимость:** Показано, что предлагаемое решение обеспечивает повышение эффективности электрического тормоза и продление ресурса тормозных колодок и колес подвижного состава.

**Ключевые слова:** Коллекторный тяговый двигатель, тормозная характеристика, тепловоз, тяговый преобразователь, тяговый привод, электрическое торможение, математическая модель, система автоматического управления, моделирование, *Matlab Simulink.*

Применение электрического торможения (ЭТ) на тепловозах с электропередачей обеспечивает как поддержание скорости при спусках, так и подтормаживание на прямых участках пути, повышая срок службы тормозных колодок и колес локомотива и вагонов поезда [1]. Укрупненная структурная схема тягового привода тепловозов с коллекторными двигателями (на примере 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ) для режима ЭТ (рис. 1) [2] показывает, что в этом режиме используется независимое возбуждение тяговых электродвигателей (ТЭД). При этом обмотки возбуждения ОВ1…ОВ6 соединены последовательно и питаются от тягового генератора ТГ через один из каналов управляемого выпрямителя УВ. Якоря ТЭД Я1…Я6 индивидуально подключены к тормозным резисторам $R_{T1}...R_{T6}$. Регу-

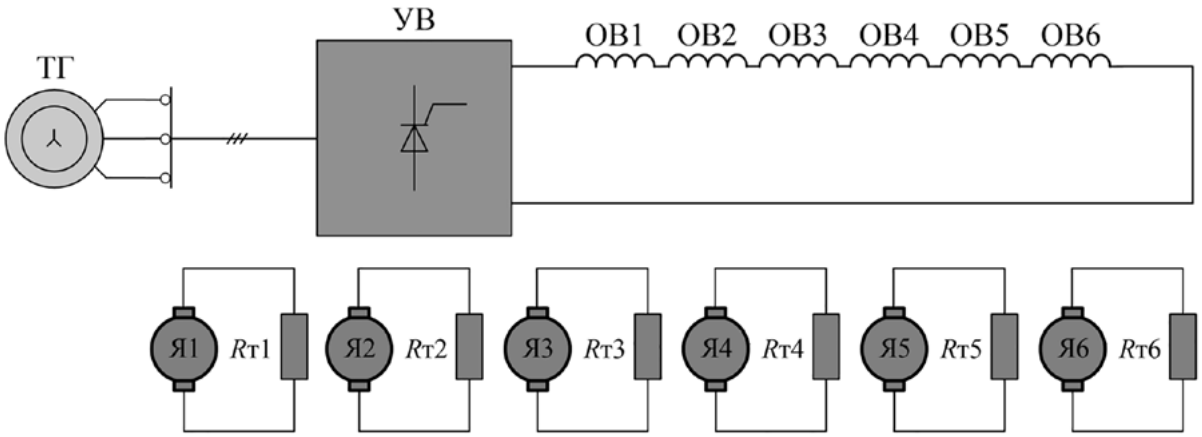



Рис. 1. Укрупненная структурная схема ЭТ тепловозов с коллекторным тяговым приводом: ОВ1…ОВ6 — обмотки возбуждения ТЭД; ТГ — тяговый генератор; УВ — управляемый выпрямитель; Я1…Я6 — якоря ТЭД; $R_{T1}$...$R_{T6}$ — тормозные резисторы

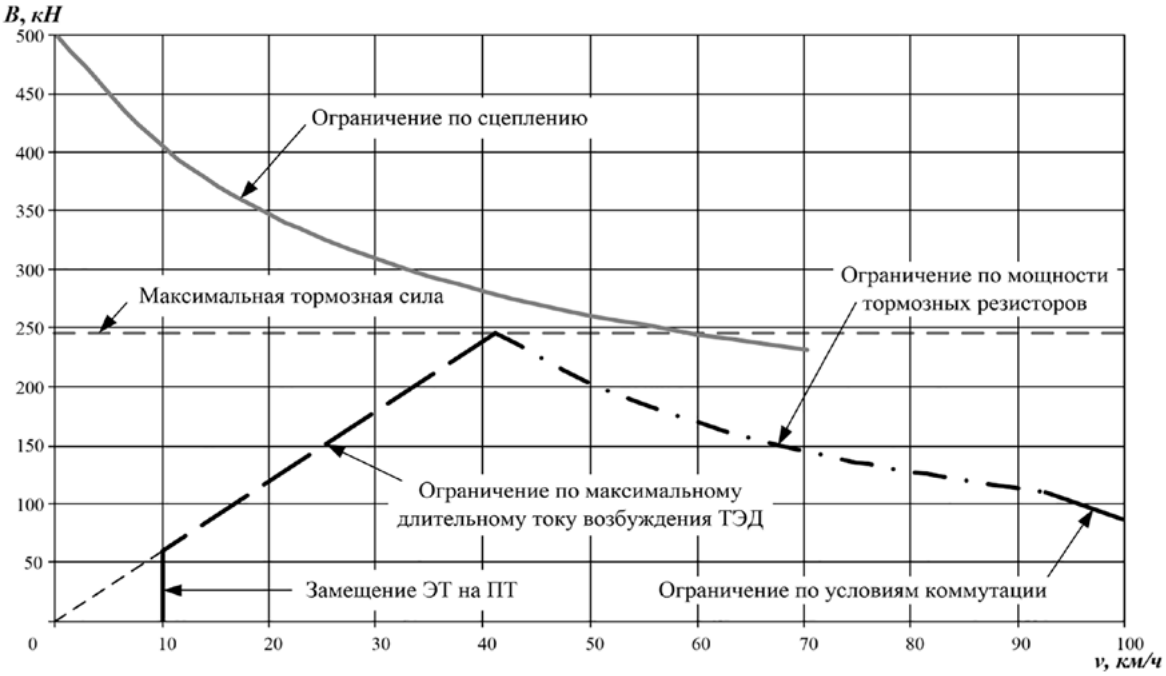



Рис. 2. Предельная тормозная характеристика секции тепловоза 2ТЭ25КМ

лирование тормозной силы происходит за счет изменения тока в обмотках возбуждения тяговых электродвигателей.

Предельная тормозная характеристика тепловоза (на примере секции 2ТЭ25КМ), соответствующая данной схеме (рис. 2), учитывает следующие ограничения, наложенные в данной схеме на тормозную характеристику:

– ограничение по условиям коммутации (по максимальной реактивной ЭДС);

– ограничение по длительному току (мощности) тормозных резисторов;

– ограничение по длительному току возбуждения ТЭД.

Показанная характеристика имеет треугольную форму с максимумом при скорости 40 км/ч,

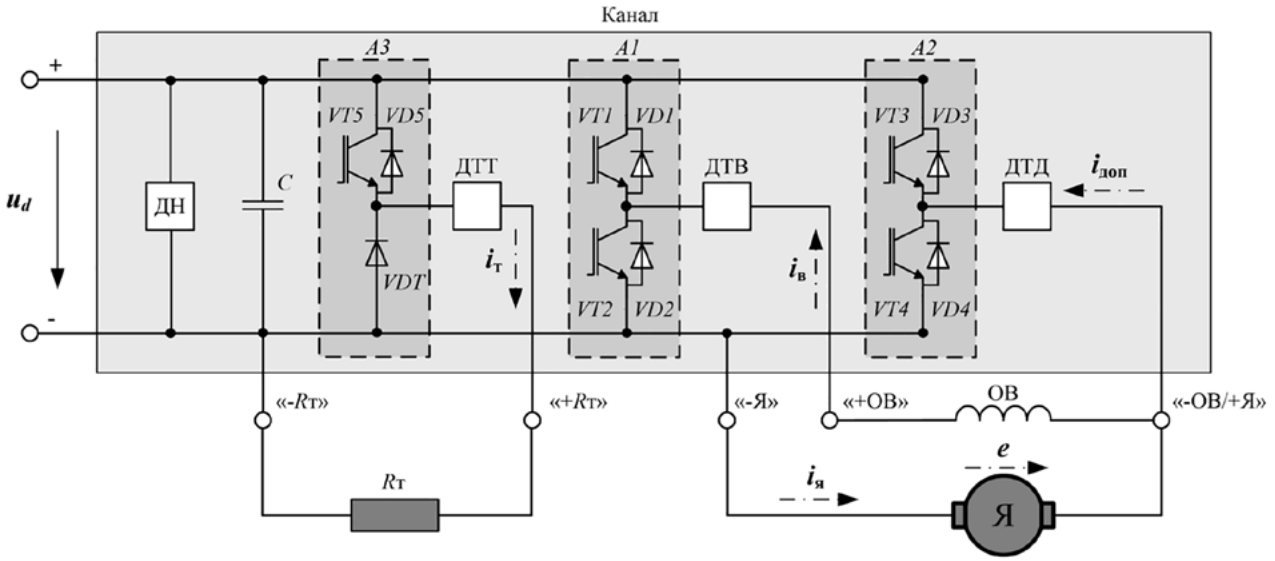



Рис. 3. Структурная схема канала ТПР для режима ЭТ: *А*1…А3 — *IGBT*-модули; ДН — датчик напряжения; ДТВ, ДТД, ДТТ — датчики тока возбуждения, дополнительного тока и тока через тормозной резистор; ОВ — обмотка возбуждения ТЭД; Я — якорь ТЭД; С — фильтровый конденсатор; $R_т$ — тормозной резистор; *VT*1…*VT*5 — *IGBT*-транзисторы; *VD*1…*VD*5 — обратные диоды, *VDT* — обратный диод тормозного тока

а на скорости 10 км/ч выполняется замещение пневматическим тормозом [3].

Как видно из рис. 1 и 2, существующее решение не обеспечивает поддержание тормозной силы в зоне низких скоростей движения и поосное управление тормозной силой, а также требует применения дополнительного источника питания ОВ.

Предлагаемое в [4] решение по применению тягового полупроводникового преобразователя (ТПР), напротив, позволяет обеспечить не только режим тяги, но и режим электрического торможения тепловоза.

Структурная схема канала ТПР для режима ЭТ (рис. 3) содержит фильтровой конденсатор С, пять силовых ключей *VT*1–*VT*5 с обратными диодами *VD*1–*VD*5, а также обратный диод тормозного тока *VDT*. На этой схеме дополнительно показаны ток якоря ($i_я$), ток возбуждения ($i_в$), дополнительный ток ($i_{доп}$), напряжение в звене постоянного тока преобразователя ($u_d$), а также обмотка возбуждения ОВ, якорь Я и ЭДС ($e$) тягового электродвигателя. Для контроля параметров используются датчики напряжения и тока ДН, ДТВ, ДТД и ДТТ. Используется последовательное возбуждение тяговых двигателей, как на электровозах ЧС2Т, ЧС6, ЧС7 [5].

За счет остаточного магнитного потока в обмотке якоря наводится небольшая по величине ЭДС $7e_0$. Включение ключа *VT*2 вызывает процесс самовозбуждения ТЭД по цепи: якорь — ОВ — ключ *VT*2. Последующая работа ключей преобразователя зависит от скорости.

В зоне низких скоростей движения преимущественно работает ключ *VT*2, закорачивая якорь и обмотку возбуждения и обеспечивая тем самым заданный ток ТЭД. Похожее решение используется на тепловозах ТЭМ7А и ТЭМ14 [6].

На высокой скорости встает вопрос обеспечения устойчивости электрического торможения [7], которая определяется неравенством:

$$\frac{de}{di_{эт}} < \frac{d}{di_{эт}}[i_{эт}(R_т + R_{дв})], \qquad (1)$$

где $R_т$ — сопротивление тормозного резистора, Ом;

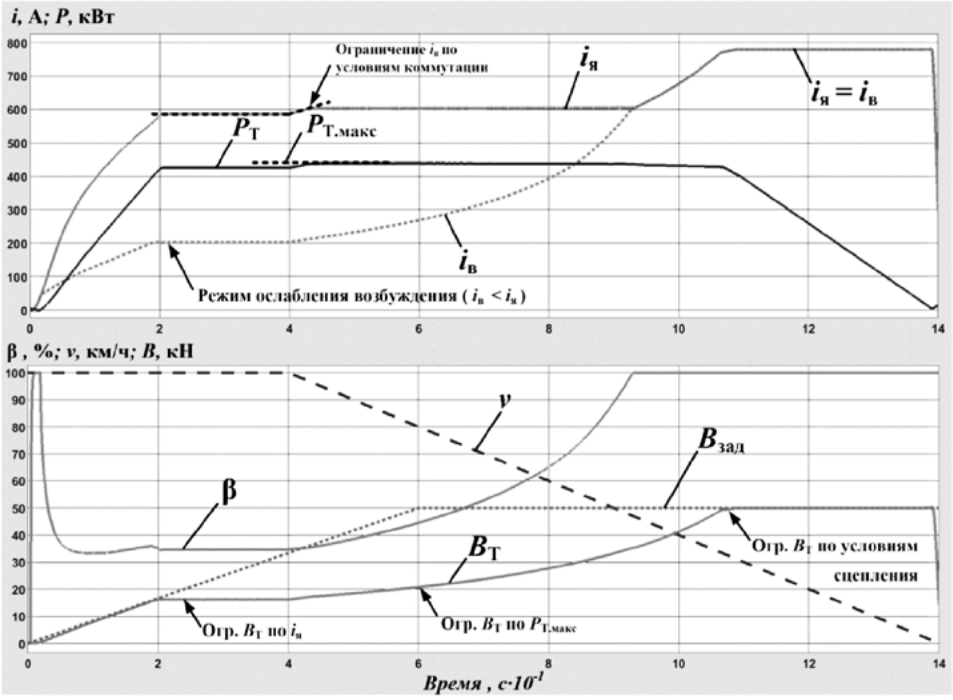



Рис. 4. Результаты моделирования работы ТПР в режиме ЭТ в диапазоне скоростей 0…100 км/ч: $i_я$, $i_в$ — токи якоря и возбуждения; $P_Т$ — мощность на тормозном реостате; $B_Т$ — тормозная сила; $B_{зад}$ — заданное значение тормозной силы; $v$ — скорость локомотива; β — коэффициент ослабления возбуждения

$R_{дв}$ — сопротивление обмоток двигателя, Ом;

$i_{эт}$ — ток двигателя в режиме ЭТ, А;

$e$ — ЭДС двигателя, В.

В предложенной схеме (рис. 3) изменять точку установившегося режима при постоянной скорости движения возможно путем увеличения эквивалентного сопротивления тормозного резистора $R_Т$ в большую сторону за счет работы ключа *VT*5 или путем использования ослабления возбуждения, что возможно за счет работы ключа *VT*4.

Таким образом, использование предложенного ТПР позволяет обеспечить работу тепловоза в режиме ЭТ с последовательным возбуждением ТЭД0 поосным управлением тормозной силой и не требует применения дополнительного источника питания.

Структурная схема системы автоматического управления тяговым преобразователем (САУ ТП) в режиме ЭТ аналогична структурной схеме САУ для режима тяги [8] (за исключением того, что входным сигналом для нее является заданная тормозная сила $B_{зад}$, а не мощность) и в настоящей работе не приводится.

Вычисление реализованной тормозной силы $B_{изм}$ колесной пары осуществляется по следующей формуле [7]:

$$B_{изм} = \frac{2M_{дв}\mu}{D_к 1000}, \qquad (2)$$

где $M_{дв}$ — крутящий момент на валу двигателя, Нм;

$D_к$ — диаметр бандажа колесной пары, м;

μ — коэффициент полезного действия редуктора;

$B_{изм}$ — тормозная сила, кН.

При этом согласно [7] механическими потерями в двигателе можно пренебречь и считать, что:

$$M_{дв} = M_Е = 9{,}55 C_Е \Phi i_я, \qquad (3)$$

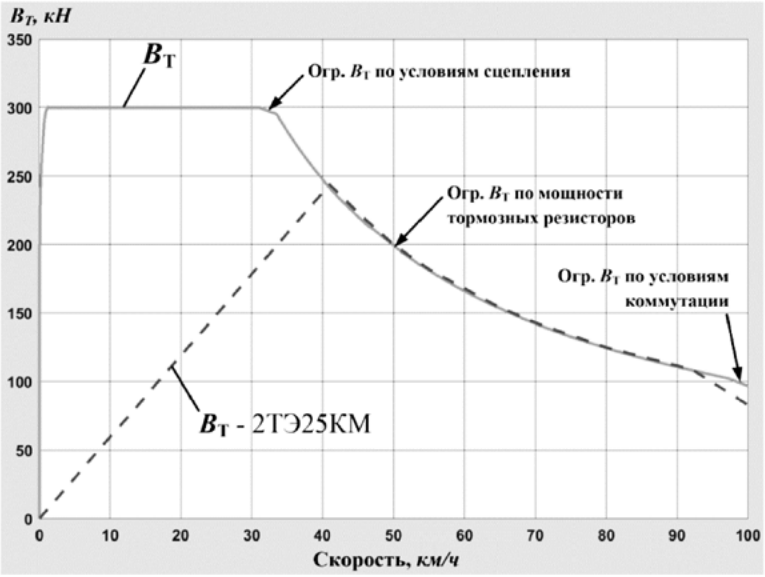



Рис. 5. Тормозная характеристика секции тепловоза

где $i_я$ — ток якоря, А;

$C_E$ — конструкционная постоянная двигателя;

Ф — магнитный поток главных полюсов, Вб;

$M_E$ — электромагнитный момент, Нм.

Магнитный поток главных полюсов рассчитывался с использованием математической модели коллекторного двигателя с раздельным учетом вихревых токов от главных и добавочных полюсов [9–11].

Для верификации предлагаемого ТПР использовалась компьютерная имитационная модель тягового привода, приведенная в [8], с использованием параметров тяговой передачи тепловоза 2ТЭ25КМ.

Результаты работы ТПР при реализации максимальной тормозной силы приведены на рис. 4.

При включении преобразователя на скорости 100 км/ч происходит самовозбуждение ТЭД, а привод сразу же переходит в режим ослабления возбуждения (β = 35 %). На интервале времени от 0 до 20 с тормозная сила $B_Т$ начинает линейно нарастать до 18 кН и из-за ограничения тока якоря $i_я$ по условиям коммутации остается на этом уровне до момента времени $t$ = 40 с.

Далее (интервал времени от 40 до 105 с) скорость движения $v$ линейно снижается. Тормозная сила $B_Т$ увеличивается по гиперболической характеристике. Такая зависимость обуславливается ограничением по максимальной мощности тормозных резисторов $P_{Т.макс}$, которое составляет 440 кВт. В момент времени $t$ = 92 с привод переходит в режим полного возбуждения.

В момент времени $t$ = 110 с при скорости 32 км/ч тормозная сила достигает максимального значения 50 кН, заданного в рамках исследования для 4 позиции контроллера машиниста, и удерживается на этом уровне вплоть до скорости, близкой к нулю.

Как видно по представленным выше результатам, предлагаемый ТПР и его САУ обеспечивают поддержание тормозной силы на заданном уровне во всем диапазоне скоростей движения, а также реализуют все ограничения, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза.

Построенная зависимость тормозной силы секции тепловоза от скорости $B_Т(v)$ (рис. 5) в диапазонах скоростей 0…41 км/ч и 92…100 км/ч проходит выше тормозной характеристики секции тепловоза 2ТЭ25КМ, показанной на этом же рисунке пунктирной линией, что обусловлено использованием ТПР. В диапазоне скоростей

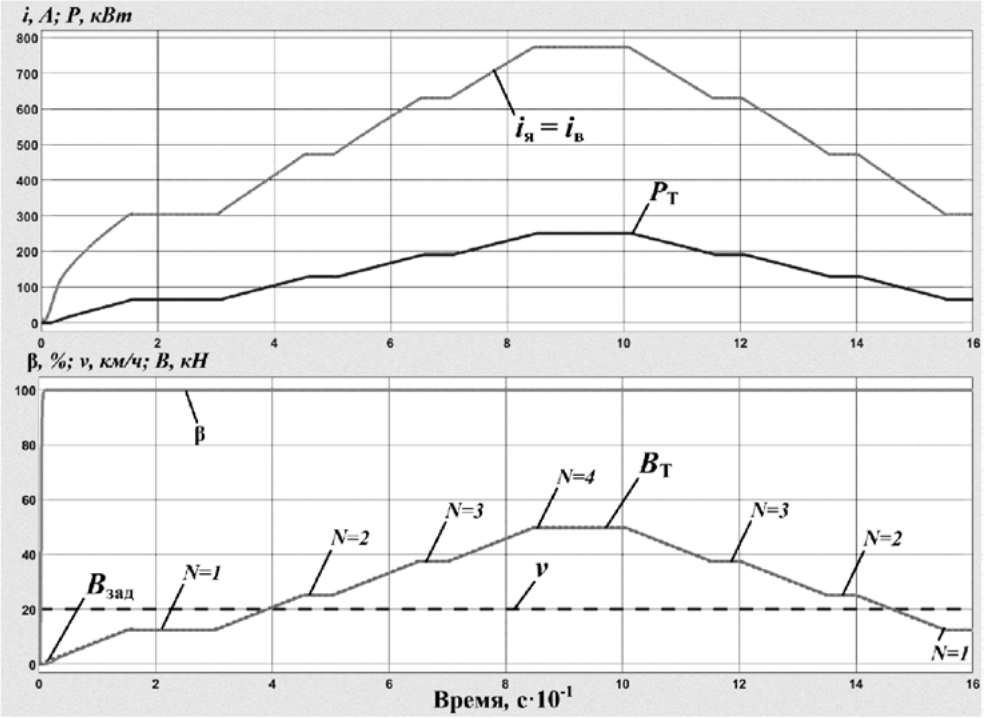



Рис. 6. Результаты моделирования работы ТПР при регулировании тормозной силы на скорости 20 км/ч: *N* — номер тормозной позиции контроллера машиниста

41…92 км/ч обе тормозные характеристики практически совпадают, что с учетом принятых допущений говорит об адекватности используемой математической модели тягового привода.

Рассмотрим результаты моделирования работы предлагаемого решения в режиме ЭТ при регулировании тормозной силы на скорости движения $v$ =20 км/ч (рис. 6).

На интервале времени от 0 до 30 с происходит плавное включение ТПР на первой тормозной позиции. Затем выполняется постепенный набор позиций с 1 до 4 (интервал времени от 30 до 100 с). Значение $B_Т$ увеличивается вслед за заданным значением $B_{зад}$, также происходит увеличение мощности на тормозном реостате $P_Т$, токов якоря и возбуждения ТЭД. На интервале времени от 100 до 160 с происходит сброс позиций КМ с 4 до 1. ТПР также обеспечивает поддержание тормозной силы в соответствии с заданием.

**Выводы**

1. Применение предлагаемого транзисторного тягового преобразователя в силовой электрической схеме тепловоза обеспечивает поосное управление коллекторным тяговым электроприводом в режиме электрического торможения с последовательным возбуждением тяговых двигателей и позволяет существенно повысить эффективность электрического тормоза на низких скоростях движения.

2. Предлагаемое решение реализует заданную тормозную силу локомотива в широком диапазоне скоростей, а также ее ограничения, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза.

3. Повышение эффективности электрического тормоза обеспечит продление ресурса тормозных колодок и колес как локомотива, так и вагонов поезда.

## Библиографический список

1. Колесник И. К. Электропередачи тепловозов на переменно-постоянном токе / И. К. Колесник, Т. Ф. Кузнецов, В. И. Липовка и др. — М.: Транспорт, 1978. — 149 с.

2. Шаркин И. А. Магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ25КМ: структура системы управления и электрооборудования / И. А. Шаркин, В. А. Чудаков, В. А. Линьков и др. // Локомотив. — 2016. — № 1. — С. 42–43.

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

4. Клименко Ю. И. Совершенствование тягового привода тепловозов с коллекторными двигателями / Ю. И. Клименко, К. С. Перфильев, В. Ю. Евсеев и др. // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Т. 2: материалы VI Междунар. научно-техн. конференции (СПб., 13–15 ноября 2018 г.). — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. — С. 24–33.

5. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж-д трансп. 3-е изд., перераб. и доп / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров и др. — М.: Транспорт, 1995. — 294 с.

6. Кузнецов Н. А. Регулятор электродинамического тормоза горочного тепловоза / Н. А. Кузнецов, В. Ю. Евсеев // Локомотив. — 2019. — № 6. — С. 39–40.

7. Осипов С. И. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж.-д. транспорта / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов; под. ред. С. И. Осипова. — М.: Маршрут, 2006. — 436 с.

8. Евсеев В. Ю. Электромагнитные процессы в коллекторном тяговом приводе тепловоза при питании от силового полупроводникового преобразователя / В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин, К. С. Перфильев // Практическая силовая электроника. — 2021. — № 4. — С. 32–38.

9. Евсеев В. Ю. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с раздельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов / В. Ю. Евсеев, А. Н. Савоськин // Электротехника. — 2020. — № 9. — С. 32–38.

10. Находкин М. Д. Проектирование тяговых электрических машин: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров и др.; под ред. М. Д. Находкина. — М.: Транспорт, 1976. — 624 с.

11. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М. З. Жиц. — М.: Транспорт, 1974. — 378 с.


Дата поступления: 01.04.2023
Решение о публикации: 19.04.2023

**Контактная информация:**
ЕВСЕЕВ Вячеслав Юрьевич — аспирант, заведующий сектором; evseev@vnikti.com
САВОСЬКИН Анатолий Николаевич — д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Электропоезда и локомотивы»; elmechtrans@mail.ru

# Simulation of Electric Braking Mode of a Diesel Locomotive with Series Excitation of Commutator Traction Motors Using a Power Semiconductor Converter

**V. Yu. Evseev[1,2], A. N. Savoskin[2]**

[1]Research and Design Institute of Rolling Stock, 410, Oktyabrskoy Revolutsii str., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation
[2]Russian University of Transport, 9-9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Evseev V. Yu., Savoskin A. N. Simulation of Electric Braking Mode of a Diesel Locomotive with Series Excitation of Commutator Traction Motors Using a Power Semiconductor Converter // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 463–470. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-463-470

## Summary

**Purpose:** To consider the structure, advantages and operating principle of a new transistor converter based on isolated gate bipolar transistors (IGBT) for diesel locomotives with commutator traction motors in the electric braking mode, as well as the implementation features of this mode on diesel locomotives. To show the functional structure of the converter automatic control system for the electric braking mode. To plot

a potential braking characteristic of a diesel locomotive with a new converter. **Methods:** Simulation modeling of the electric braking mode using a computational mathematical model of a traction drive in the *Matlab Simulink* environment. Analysis of the simulation results of the traction drive operation in stationary and dynamic conditions. Comparison of the obtained braking characteristic with the existing one for 2TE25KM diesel locomotive. **Results:** It is established that the use of the proposed transistor traction converter in the power electrical circuit of a diesel locomotive provides axis-by-axis control of a commutator traction electric drive in the electric braking mode with series excitation of traction motors and allows to significantly increase the electric brake efficiency at low speeds. The proposed solution implements the target braking force of the locomotive in a wide range of speeds, as well as its limitations due to the electromechanical parameters of the diesel locomotive assemblies. **Practical significance:** It is shown that the proposed solution provides the increase of the electric brake efficiency, life extension of brake shoes and wheels of the rolling stock.

**Keywords:** Commutator traction motor, braking characteristic, diesel locomotive, traction converter, traction drive, electric braking, mathematical model, automatic control system, simulation, *Matlab Simulink.* a

## References

1. Kolesnik I. K., Kuznetsov T. F., Lipovka V. I. et al. *Elektroperedachi teplovozov na peremenno-postoyannom toke* [AC-DC power transmissions of diesel locomotives]. Moscow: Transport Publ., 1978, 149 p. (In Russian)

2. Sharkin I. A., Chudakov V. A., Linkov V. A. et al. Magistral'nyy gruzovoy teplovoz 2TE25KM: struktura sistemy upravleniya i elektrooborudovaniya [2TE25KM mainline freight diesel locomotive: structure of the control system and of the electrical equipment]. *Locomotiv* [Locomotive]. 2016, Iss. 1, pp. 42–43. (In Russian)

3. *Rukovodstvo po ekspluatatsii 2TE25KM RE. Magistral'nyy gruzovoy dvukhsektsionnyy teplovoz 2TE25KM* [2TE25KM RE operating manual. 2TE25KM mainline freight twin-unit diesel locomotive]. Bryansk, ZAO "UK "BMZ" (CJSC "Managing Company "Bryansk Machine-Building Plant"), 2015, 153 p. (In Russian)

4. Klimenko Yu. I., Perfilyev K. S., Evseev V. Yu. et al. Sovershenstvovaniye tyagovogo privoda teplovozov s kollektornymi dvigatelyami [Improving the traction drive of diesel locomotives with commutator engines]. *Lokomotivy. Elektricheskiy transport. XXI vek. T. 2: materialy VI Mezhdunar. nauchno-tekhn. konferentsii (SPb., 13–15 noyabrya 2018 g.)* [Electric transport. XXI Century. Vol. 2: Materials of the VI Intern. scientific and technical conference (St. Petersburg, November 13–15, 2018)]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2018, pp. 24–33. (In Russian)

5. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. et al. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow: Transport Publ., 1995, 294 p. (In Russian)

6. Kuznetsov N. A., Evseev V. Yu. Regulyator elektrodinamicheskogo tormoza gorochnogo teplovoza [Electrodynamical brake governor of the hump diesel locomotive]. *Locomotiv* [Locomotive]. 2019, Iss. 6, pp. 39–40. (In Russian)

7. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Ed. by S. I. Osipov. Moscow: Marshrut Publishing House Publ., 2006, 436 p. (In Russian)

8. Evseev V. Yu., Savoskin A. N., Perfilyev K. S. Elektromagnitnyye protsessy v kollektornom tyagovom privode teplovoza pri pitanii ot silovogo poluprovodnikovogo preobrazovatelya [Electromagnetic processes in the commutator traction drive of a diesel locomotive powered by a power semiconductor converter]. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics]. 2021, Iss. 4, pp. 32–38. (In Russian)

9. Evseev V. Yu., Savoskin A. N. Matematicheskaya model' kollektornogo tyagovogo dvigatelya s razdel'nym uchetom vikhrevykh tokov glavnykh i dobavochnykh polyusov [Mathematical model of a commutator traction motor with separate consideration of eddy currents of the main and commutating poles]. *Elektrotekhnika* [Electrothechnics]. 2020, Iss. 9, pp. 32–38. (In Russian)

10. Nakhodkin M. D., Vasilenko G. V., Bocharov V. I. et al. *Proyektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin* [Design of traction electric machines]. Ed. by M. D. Nakhodkin. Moscow: Transport Publ., 1976, 624 p. (In Russian)

11. Zhits M. Z. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh postoyannogo toka* [Transient processes in DC machines]. Moscow: Transport Publ., 1974, 378 p. (In Russian)

Received: April 01, 2023
Accepted: April 19, 2023

**Author's information:**
Vyacheslav Yu. EVSEEV — Postgraduate Student, Head of Sector; evseev@vnikti.com
Anatoly N. SAVOSKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor, Department "Electric Trains and Locomotives"; elmechtrans@mail.ru

УДК 53.06

# Обзор алгоритма программного обеспечения для диагностики остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава

**П. В. Борисов, А. А. Воробьев**

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

**Для цитирования:** *Евстафьев А. М., Борисов П. В., Воробьев А. А.* Обзор алгоритма программного обеспечения для диагностики остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 471–477. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-471-477

## Аннотация

**Цель:** Обзор алгоритма оценки остаточного ресурса литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи в процессе функциональной диагностики накопителя электрической энергии, основанного на базе измерения возмущающих воздействий пульсаций протекающего тока. **Методы:** Используя результат ранее проведенных экспериментальных исследований по измеряемым параметрам литий-ионной аккумуляторной батареи при работе с преобразователем электрической энергии, предполагается набор статистических данных, который посредством описанного алгоритма будет производить оценку остаточного ресурса элемента батареи. **Результаты:** Рассмотрен алгоритм программного обеспечения функциональной диагностики литий-ионной аккумуляторной батареи при работе в звене постоянного тока с преобразователем частоты на основании ранее проведенного физического эксперимента по набору статистических параметров литий-ионной батареи в процессе эксплуатации. **Практическая значимость:** Проведенный обзор статистических данных исследуемого накопителя дает возможность проведения функциональной диагностики определения текущего ресурсного состояния литий-ионной аккумуляторной батареи.

**Ключевые слова:** Литий-ионная аккумуляторная батарея, функциональная диагностика, программное обеспечение, алгоритм диагностики.

## Введение

В процессе решения задачи диагностирования накопителя литий-ионного аккумулятора (ЛИА) тягового подвижного состава (ТПС) производится исследование основных параметров ЛИА ТПС, удовлетворяющих условиям эксплуатации ТПС. Если представить ЛИА ТПС в обобщенном виде, в качестве диагностического объекта (ОД), то диагностический процесс представляет собой повторную подачу определенных входных воздействий на ОД, изображенных на рис. 1, измерение и анализирование ответов, поступающих от средств диагностирования (СД) на входы объекта, являющиеся внешними (рабочими) сигналами, определяемыми алгоритмом работы устройства. Измерение, а также анализ реакций ОД всегда выполняется с помощью СД. Взаимодействие объектов и средств образует систему диагностирования [1].

Для создания гибридной силовой установки для перспективного транспортного средства целесообразна топология, при которой каждый накопительный источник энергии подключается к общей шине постоянного тока через двунаправленные преобразователи постоянного тока [2]. Поскольку двунаправленный преобразователь постоянного тока подключен между каждым устройством накопления энергии и общей шиной постоянного тока, теоретически количе-

Рис. 1. Процесс объекта диагностирования

ство источников и преобразователей может быть неограниченным [3].

Основная задача системы управления энергопотреблением гибридной силовой установки — управлять потреблением, генерацией и хранением энергии для обеспечения максимальной эффективности всей системы. Разработка единой системы управления энергопотреблением и мгновенной мощностью представляет собой сложное сочетание нескольких локальных задач, которые можно сформулировать следующим образом: выработка электроэнергии; мониторинг качества и стабильности электроэнергии; координация потоков энергии и мощности [4].

Для контроля качества и стабильности электроэнергии гибридной установки совместно с ЛИА в процессе эксплуатации преобразователя электрической энергии, работающего совместно с ЛИА электрическим аккумулятором, необходимо иметь информацию о степени заряженности аккумулятора SOC (State of Charge) [5] для того, чтобы прогнозировать возможность дальнейшей работы ТПС, питаемой от аккумулятора, или принять решение о зарядке этого аккумулятора [6]. В процессе непрерывно длительной эксплуатации ЛИА также важно знать остаточную емкость, когда его характеристики выйдут за допустимые эксплуатационные пределы и потребуется его замена.

При обслуживании ЛИА по текущему состоянию известно два метода диагностирования:

1. *Система тестовой диагностики* [1] (рис. 2) обеспечивает тестовые воздействия на объект от средств диагностирования. Других сигналов на объект не поступает. Следовательно, как состав, так и последовательность этих воздействий могут быть выбраны исходя из условий эффективной организации диагностического процесса. Каждое

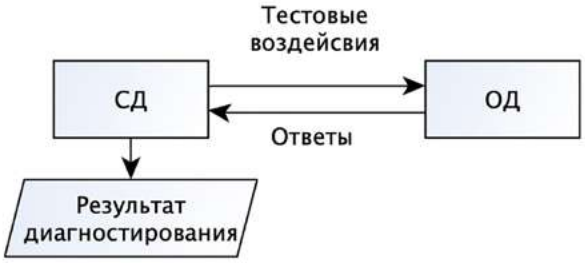



Рис. 2. Система тестового диагностирования технического состояния объекта

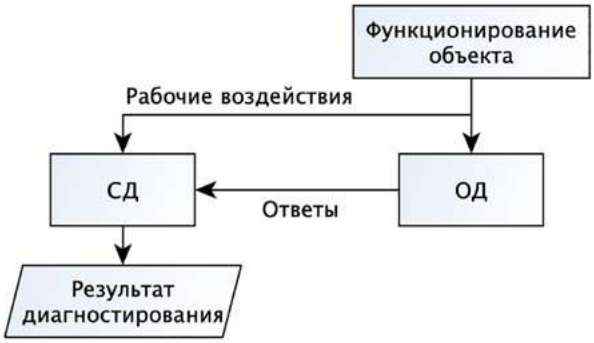



Рис. 3. Система функционального диагностирования технического состояния объекта

следующее воздействие может быть назначено в зависимости от реакции объекта на предыдущее воздействие. Воздействие в такой системе называется испытанием. Примером тестовой диагностики является тестирование батарей на стенде.

2. *Система функциональной диагностики* [1] (рис. 3) не предусматривает того, чтобы диагностическое средство производило тестовое воздействие на объект. ОД и СД получают рабочие воздействия, предусмотренные алгоритмом функционирования объекта. СД работает во время рабочего функционирования ОД, а также решает задачу правильного функционирования и устранения неполадок, которые мешают нормальному функционированию. Примером функ-

циональной диагностики служит получение данных о текущем состоянии дизельной установки локомотива по угару масла повышению расхода топлива при той же вывозной работе [7, 8].

## Алгоритм программного обеспечения ЛИА накопителя для ТПС

Данный алгоритм, составленный в соответствии с [9], изображенный на рис. 4 определения остаточного ресурса ЛИА для ТПС, относится к средствам функциональной диагностики накопителя. Алгоритм основан на ранее проведенных работах [10]. Для определения данных о текущих значениях тока, напряжения, каждой ячейки ЛИА в накопителе должны быть предусмотрены соответствующие датчики.

В качестве исходных данных, перечисленных на рис. 4, *а*, применяются данные: элементов эквивалентной схемы замещения $R_{0(n-1)}$, $R_{1(n-1)}$ и $C_{0(n-1)}$, число отработанных циклов $n_{\text{отраб}}$, уровень заряда SOC, фиксируется режим работы (разряд/заряд), а также температура ячеек ЛИА. На этом этапе также фиксируется значение остаточного ресурса на момент цикла, для нового аккумулятора значение равно полной рабочей емкости, а для ЛИА с частично отработанным ресурсом проводится калибровочный тест полного заряда/разряда согласно ГОСТ Р МЭК 62813—2020 [11]

Электрическая импедансная спектрометрия является часто используемой методикой для определения динамического поведения электрохимических систем [12–14]. Из пульсирующего тока выводится комплексный импеданс, который описывает передаточную функцию исследуемой системы и содержит информацию о соотношении амплитуд и сдвиге фаз между напряжением и током для определенной частоты. Для нелинейных, близких к синусоидальной, форм тока и напряжения, $i(t)$ (1) и $u(t)$ (2), определенной частоты $f$ и с амплитудами и, комплексный импеданс $Z(f)$ (3) (рис. 4, *б*):

$$i(t) = \hat{I} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)} = \hat{I} \cdot e^{j(2\pi f t + \varphi_i)}; \quad (1)$$

$$u(t) = \hat{U} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)} = \hat{U} \cdot e^{j(2\pi f t + \varphi_i)}; \quad (2)$$

$$Z(t) = \frac{i(t)}{u(t)} = \frac{\hat{I} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)}}{\hat{U} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)}} = \frac{\hat{I} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)}}{\hat{U} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)}}, \quad (3)$$

где $Z(f)$ дает информацию о соотношении амплитуд, а φ — о сдвиге фаз.

Величины элементов эквивалентной схемы замещения ЛИА $R_{0(n)}$, $R_{1(n)}$ и $C_{0(n)}$ сравниваются с ранее полученными значениями $R_{0(n-1)}$, $R_{1(n-1)}$ и $C_{0(n-1)}$, изображенными на рис. 4, *в*. Определение данных значений производится при фиксированном уровне SOC и соответствующем режиме работы ЛИА (рис. 4, *г*). Способ расчета величин (4–6) рассмотрен ранее в работе [10]:

$$R_0 = \frac{\Delta U_0}{\Delta I}; \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{\Delta U_1}{\Delta I}; \quad (5)$$

$$C = \tau \frac{R_0 + R_1}{R_0 \cdot R_1}, \quad (6)$$

где $\omega = \frac{1}{\tau}$ — частота сопряжения.

Уровень заряда SOC ЛИА определяется посредством метода Калмана [15–19], также допускаются определения заряженности ЛИА посредством кулоновского счета [20], в алгоритме может применяться любой способ определения SOC.

В качестве теоретического значения остаточного ресурса (рис. 4, *д*) высчитывается разница между общим количеством циклов, заявленных производителем $n_{\text{всего}}$, и числом отработанных циклов $n_{\text{отраб}}$.

Температура одиночных ячеек должна контролироваться, так как в процессе эксплуатации

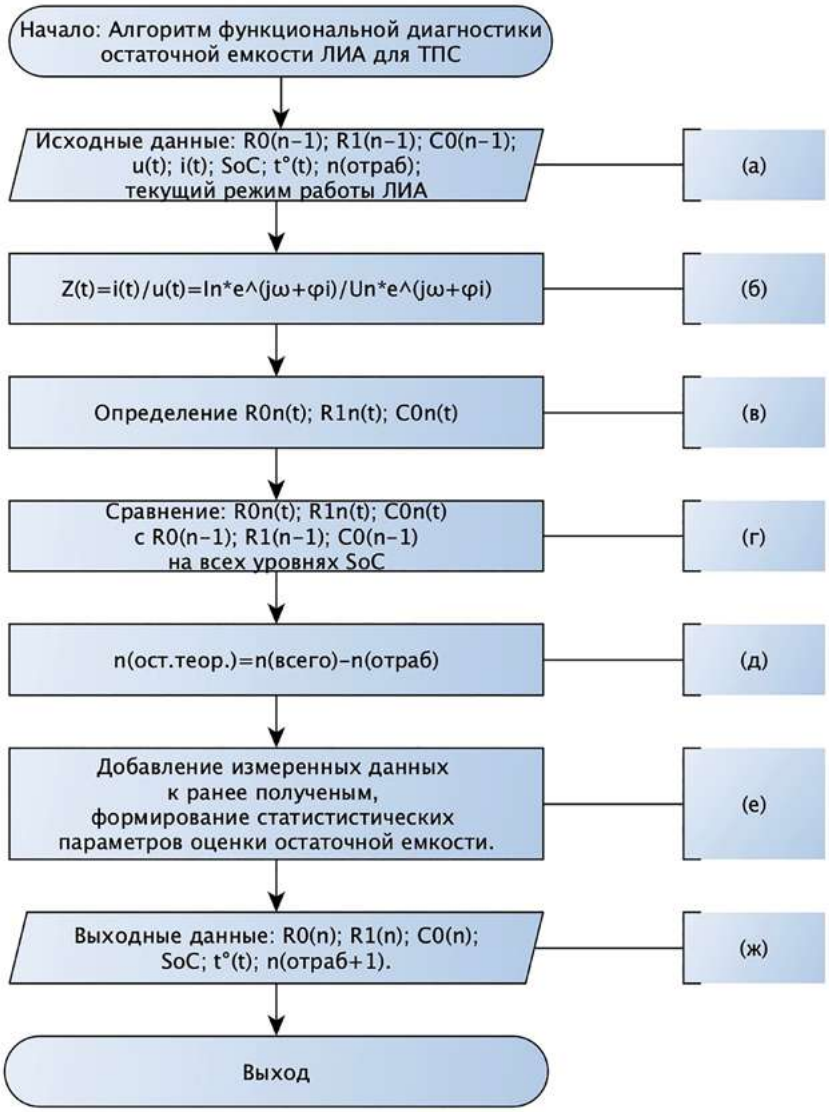



Рис. 4. Алгоритм определения остаточного ресурса

нагруженные ЛИА расходуют часть «бесполезной» на нагрев, от этого измеренные значения $i(t)$ и $u(t)$ могут отличаться на одном уровне заряда с одинаковой нагрузкой.

Внутреннее сопротивление ЛИА оказывает влияние на энергетические возможности батареи. При увеличении сопротивления энергоемкость снижается. Более того, максимальное и минимальное напряжения достигаются раньше — во время зарядки или разрядки, что может заметно снизить «доступную» емкость.

Набор данных текущего цикла добавляется к ранее полученным значениям, формируя статистический ряд данных для формирования параметра оценки остаточной емкости (рис. 4, *е*).

На основания обработки выходных данных (рис. 4, *ж*) изменяется текущее значение остаточной емкости, из которых запоминается для сравнения со значениями следующего измерительного цикла.

Предложенный алгоритм диагностирования ЛИА предусматривает набор проверок и вычислений параметров ЛИА, которые проводятся во время рабочих воздействий; формируется массив результатов элементарных проверок, которые через устройство связи поступают на вход

блока расшифровки результатов. Получившийся результат сравнивается с ранее полученными значениями. Данные фиксируются на протяжении всей работы ЛИА совместно со статическим преобразователем энергии, на протяжении всех значений заряда, как в режиме заряда, так и разряда.

## Заключение

В данной статье был предложен алгоритм функционального диагностирования ЛИА ТПС при работе совместно с преобразователем энергии на основании ранних работ [10]. При оптимизированных значениях параметров накопителя может быть достигнуто соответствие между измеренным и предсказанным значениями батареи.

**Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».**

## Библиографический список

1. Сапожников В. В. Основы технической диагностики: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — М.: Маршрут, 2004. — 318 с.

2. Евстафьев А. М. Выбор топологии схем тягового привода электрического подвижного состава / А. М. Евстафьев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2010. — Вып. 3(24). — С. 89–98.

3. Власьевский С. В. Сравнение энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторным и асинхронным приводом / С. В. Власьевский, Д. В. Грибенюк, М. С. Алексеева // Вестник Ин-та тяги и подвижного состава. — 2016. — № 12. — С. 24–27.

4. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе / А. М. Евстафьев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2018. — С. 27–38.

5. ГОСТ Р МЭК 62660-2—2020. Аккумуляторы литий-ионные для электрических дорожных транспортных средств. Часть 2. Испытания на надежность и эксплуатацию с нарушением режимов. — М.: Стандартинформ, 2020.

6. ГОСТ 20911—89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандарты, 1990.

7. Грачев В. В. Оценка технического состояния тепловозного дизеля по данным бортовой микропроцессорной системы управления / В. В. Грачев, М. Ш. Валиев // Известия ПГУПСа. — 2010. — № 1(22). — С. 22–32.

8. Валиев М. Ш. Диагностика рабочего процесса тепловозного дизеля в условиях эксплуатации / М. Ш. Валиев // Вестник транспорта Поволжья. — Самара: Самарский государственный университет путей сообщения. — 2011. — № 1(25). — С. 35–39.

9. ГОСТ 19.701—90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. — М.: Стандарт, 1992.

10. Борисов П. В. Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи / П. В. Борисов, А. А. Воробьев, К. В. Константинов и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 207–221. — DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221.

11. ГОСТ Р МЭК 62813—2020. Конденсаторы литий-ионные для электрического и электронного оборудования. Методы испытаний электрических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2021.

12. Липкин М. С. Диагностика литий-ионных аккумуляторов методами электрохимического импеданса / М. С. Липкин, Е. В. Корбова, М. В. Луковкин и др. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2023. — № 1. — С. 43–48. — DOI: 10.17213/1560-3644-2023-1-43-48.

13. Lasia A. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications / A. Lasia // Modern Aspects of Electrochemistry. — 1999. — Vol. 32. — P. 143.

14. Macdonald J. R. Impedance spectroscopy / J. R. Macdonald // Ann Biomed Eng. — 1992. — Iss. 20(3). — Pp. 289–305.

15. Сяоган У. Определение уровня заряда литий-ионного аккумулятора на основе алгоритма расширенного фильтра Калмана / У. Сяоган, С. Ли, Н. И. Щуров и др. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технология. — 2020. — Вып. 13(4). — С. 420–437. — DOI: 10.17516/1999-494X-0242.

16. Zhang J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery / J. Zhang, J. Lee // Journal of Power Sources. — 2011.

17. Plett G. L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs / G. L. Plett // Journal of Power Sources. — 2004.

18. Yuan S. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model / S. Yuan, H. Wu, C. Yin // Energies. — 2013. — Iss. 6(1). — Pp. 444–470.

19. He W. State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering / W. He, N. Williard, Ch. Chen et al. // Microelectronics Reliability. — 2013. — Iss. 53(6). — Pp. 840–847. — DOI: 10.1016/j.microrel.2012.11.010.

20. Aylor J. H. A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs / J. H. Aylor, A. Thieme, B. W. Johnso // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 1992. — Iss. 39(5). — Pp. 398–409. — DOI: 10.1109/41.161471.

Дата поступления: 05.05.2023
Решение о публикации: 30.05.2023

**Контактная информация:**
БОРИСОВ Павел Владимирович — аспирант; borisovpavel10@yandex.ru
ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

## Review of the Software Algorithm for Diagnosing the Residual Life of Lithium–Ion Batteries of Traction Rolling Stock

**P. V. Borisov, A. A. Vorob'ev**

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

**For citation:** Evstafiev A. M., Borisov P. V., Vorob'ev A. A. Review of the Software Algorithm for Diagnosing the Residual Life of Lithium-Ion Batteries of Traction Rolling Stock // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 471–477. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-471-477

### Summary
**Purpose:** Review of the algorithm for assessing the residual life of the lithium iron phosphate battery in the process of functional diagnostics of the electric energy storage device, based on the measurement of disturbing influences of current pulsations. **Methods:** Using the result of previously conducted experimental studies on the measured parameters of the lithium-ion battery pack when working with the electric energy converter, a set of statistic data is assumed, which by means of the described algorithm will produce an estimate of the remaining life of the battery cell. **Results:** The software algorithm for functional diagnostics of the lithium-ion battery pack when working in the direct current link with the frequency converter based on the previously conducted physical experiment that collected statistical parameters of the lithium-ion battery pack in operation is considered. **Practical significance:** The conducted review of the statistical data of the investigated storage device gives the possibility to carry out functional diagnostics of the current resource state of the lithium-ion battery pack.

**Keywords:** Lithium-ion battery pack, functional diagnostics, software, diagnostic algorithm.

### References
1. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki: ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transporta* [Fundamentals of technical diagnostics: textbook. allowance for universities railway transport]. Moscow: Marshrut Publ., 2004, 318 p. (In Russian)

2. Evstaf'ev A. M. Vybor topologii skhem tyagovogo privoda elektricheskogo podvizhnogo sostava [Choice of topology of schemes of traction drive of electric rolling stock]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg. University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2010, Iss. 3(24), pp. 89–98. (In Russian)

3. Vlas'evskiy S. V., Gribenyuk D. V., Alekseeva M. S. Sravnenie energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peremennogo toka s kollektornym i asinkhronnym privodom [Comparison of the energy efficiency of alternating current electric locomotives with a collector and asynchronous drive]. *Vestnik In-ta tyagi i podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock]. 2016, Iss. 12, pp. 24–27. (In Russian)

4. Evstaf'ev A. M. Primenenie gibridnykh tekhnologiy v tyagovom podvizhnom sostave [Application of hybrid technologies in traction rolling stock]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2018, pp. 27–38. (In Russian)

5. *GOST R MEK 62660-2—2020. Akkumulyatory litiy-ionnye dlya elektricheskikh dorozhnykh transportnykh sredstv. Chast' 2. Ispytaniya na nadezhnost' i ekspluatatsiyu s narusheniem rezhimov* [GOST R IEC 62660-2—2020. Lithium-ion batteries for electric road vehicles. Part 2. Tests for reliability and operation with violation of modes]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian)

6. *GOST 20911—89. Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya* [GOST 20911—89. Technical diagnostics. Terms and Definitions]. Moscow: Standarty Publ., 1990. (In Russian)

7. Grachev V. V., Valiev M. Sh. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya teplovoznogo dizelya po dannym bortovoy mikroprotsessornoy sistemy upravleniya [Assessment of the technical condition of a diesel engine according to the data of the onboard microprocessor control system]. *Izvestiya PGUPSa* [Izvestiya PGUPS]. 2010, Iss. 1(22), pp. 22–32. (In Russian)

8. Valiev M. Sh. Diagnostika rabochego protsessa teplovoznogo dizelya v usloviyakh ekspluatatsii [Diagnostics of the working process of a diesel locomotive under operating conditions]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. Samara: Samarskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2011, Iss. 1(25), pp. 35–39. (In Russian)

9. *GOST 19.701—90. Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii. Skhemy algoritmov, programm, dannykh i sistem. Oboznacheniya uslovnye i pravila vypolneniya* [GOST 19.701—90. Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii. Skhemy algoritmov, programm, dannykh i sistem. Oboznacheniya uslovnye i pravila vypolneniya]. Moscow: Standart Publ., 1992. (In Russian)

10. Borisov P. V., Vorob'ev A. A., Konstantinov K. V. et al. Issledovanie kharakteristik litiy-ionnoy akkumulyatornoy batarei [Investigation of the characteristics of a lithium-ion battery]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2023, vol. 20, Iss. 1, pp. 207–221. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221. (In Russian)

11. *GOST R MEK 62813—2020. Kondensatory litiy-ionnye dlya elektricheskogo i elektronnogo oborudovaniya. Metody ispytaniy elektricheskikh kharakteristik* [GOST R IEC 62813—2020. Li-ion capacitors for electrical and electronic equipment. Test methods for electrical characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian)

12. Lipkin M. S., Korbova E. V., Lukovkin M. V. et al. Diagnostika litiy-ionnykh akkumulyatorov metodami elektrokhimicheskogo impedansa [Diagnostics of lithium-ion batteries by electrochemical impedance methods]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [Izv. universities. North-Kavk. region. Tech. Sciences]. 2023, Iss. 1, pp. 43–48. DOI: 10.17213/1560-3644-2023-1-43-48. (In Russian)

13. Lasia A. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. Modern Aspects of Electrochemistry, 1999, vol. 32, p. 143.

14. Macdonald J. R. Impedance spectroscopy. Ann Biomed Eng, 1992, Iss. 20(3), pp. 289–305.

15. Syaogan U., Li S., Shchurov N. I. et al. Opredelenie urovnya zaryada litiy-ionnogo akkumulyatora na osnove algoritma rasshirennogo fil'tra Kalmana [Determining the charge level of a lithium-ion battery based on the extended Kalman filter algorithm]. *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Tekhnika i tekhnologiya* [Zh. Sib. feder. university Technique and technology]. 2020, Iss. 13(4), pp. 420–437. DOI: 10.17516/1999-494X-0242. (In Russian)

16. Zhang J., Lee J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery. Journal of Power Sources, 2011.

17. Plett G. L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Journal of Power Sources, 2004.

18. Yuan S., Wu H., Yin C. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model. Energies, 2013, Iss. 6(1), pp. 444–470.

19. He W., Williard N., Chen Ch. et al. State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering. Microelectronics Reliability, 2013, Iss. 53(6), pp. 840–847. DOI: 10.1016/j.microrel.2012.11.010.

20. Aylor J. H., Thieme A., Johnso B. W. A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, Iss. 39(5), pp. 398–409. DOI: 10.1109/41.161471.

Received: May 05, 2023
Accepted: May 30, 2023

**Author's information:**
Pavel V. BORISOV — Postgraduate Student; borisovpavel10@yandex.ru
Alexander A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

УДК 625.033.34

# Применение нейронных сетей для распознавания объектов на железнодорожном транспорте

**А. Н. Сычугов, В. Н. Михейчиков, М. В. Чернышов**

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

**Для цитирования:** *Сычугов А. Н., Михейчиков В. Н., Чернышов М. В.* Применение нейронных сетей для распознавания объектов на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 478–491. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-478-491

## Аннотация

**Цель:** С помощью систем технического зрения и нейросетей, таких как YOLOv8 и MASK R-CNN, можно быстро и точно обнаруживать предметы, которые могут привести к аварии или задержке поездов. YOLOv8 — это один из самых популярных алгоритмов обнаружения объектов в реальном времени, который использует глубокие нейронные сети для классификации и локализации объектов. YOLOv8 может обнаруживать объекты на изображениях и видео с высокой скоростью и точностью. Эта модель может работать на различных аппаратных платформах, включая мобильные устройства и компьютеры. MASK R-CNN — это еще более продвинутый алгоритм обнаружения объектов, который имеет способность выделять объекты и их контуры с высокой точностью. MASK R-CNN использует сверточные нейронные сети и методы сегментации масок для обнаружения объектов. Он может работать как в режиме реального времени, так и на статических изображениях. Когда системы технического зрения оснащены нейросетями YOLOv8 и MASK R-CNN, они могут оперативно реагировать на посторонние объекты, которые появляются на рельсах. Целью статьи является разработка алгоритмов обнаружения объектов железнодорожного транспорта и препятствий с помощью технического зрения и нейронных сетей, оценка эффективности алгоритмов. **Методы:** Алгоритм YOLOv8 основан на архитектуре сверточных нейронных сетей и использует методы обучения с учителем. Эта модель принимает изображение в качестве входных данных и выдает оценки вероятности того, что на изображении присутствует определенный объект в режиме реального времени. Для этого YOLOv8 использует методы определения областей интереса (ROI), позволяющие определить области изображения, на которых могут быть расположены объекты. Алгоритм MASK R-CNN использует более сложные методы, такие как методы сегментации масок и пропорциональное изменение размера области интереса (RoIAlign), что позволяет получать более точные результаты выделения объектов на изображениях и видео. Он также основан на сверточных нейронных сетях и использует методы обучения с учителем. MASK R-CNN использует методы сегментации масок для определения контура объекта на изображении, а также метод RoIAlign, который позволяет получить лучшее качество при обработке различных размеров изображений. Общими математическими методами, которые используются в YOLOv8 и MASK R-CNN, являются методы сверточной нейронной сети, обучения с учителем и оптимизации функции потерь. Они основаны на алгоритмах глубокого обучения, таких как стохастический градиентный спуск и обратное распространение ошибки. **Результаты:** Алгоритм обнаружения посторонних объектов на пути следования подвижного состава с помощью системы технического зрения, расчет оценки качества работы нейронных сетей, сформированы матрицы ошибок, получены результаты обработки нейронных сетей. **Практическая значимость:** Разработан алгоритм обнаружения посторонних объектов на пути следования подвижного состава с помощью системы технического зрения, обучены две нейронные сети для обнаружения объектов железнодорожного транспорта и препятствий на пути.

**Ключевые слова:** Нейронная сеть, цифровые технологии, подвижной состав, алгоритм, техническое зрение.

## 1. Анализ развития цифровых технологий на подвижном составе

Цифровые технологии на подвижном составе позволяют повысить эффективность, безопасность и качество эксплуатации подвижного состава с помощью сбора, обработки и анализа данных о его состоянии, местоположении, движении и окружающей среде.

Для реализации цифровой стратегии ОАО «РЖД» создало специализированную дочернюю компанию — ООО «РЖД-Технологии», которая координирует ключевые проекты, разрабатывает цифровые продукты и обеспечивает высокотехнологичные разработки в холдингах [1]. Кроме того, ОАО «РЖД» сотрудничает с ведущими ИТ-компаниями, научными организациями и стартапами в области цифровых инноваций.

Основные направления цифровизации РЖД можно разделить на три группы: цифровая железная дорога, цифровые пассажирские решения и цифровые грузовые решения.

С технологических позиций цифровую железную дорогу можно определить как совокупность цифровых технологий и методов описания инфраструктуры, подвижного состава, перевозочного процесса и базирующихся на них технологий управления движением, обеспечения безопасности и содержания инфраструктуры, которые ориентированы на достижение принципиально новых автоматизированных методов планирования, диспетчерского управления движением, ресурсами и обслуживания пассажиров [2]. К таким технологиям относятся:

Промышленный интернет вещей (Industrial Internet of Things) — это сеть устройств и датчиков, установленных на подвижном составе и инфраструктуре, которые передают данные в реальном времени через беспроводную связь на специализированные платформы для обработки и анализа. IIoT позволяет мониторить и контролировать состояние подвижного состава, предотвращать неисправности и аварии, оптимизировать расход топлива и ресурсов, а также управлять логистикой и грузоперевозками.

Big Data — это большие объемы структурированных и неструктурированных данных, которые собираются из разных источников, таких как IIoT, видеокамеры, радары, спутниковая навигация и другие. Big Data позволяет проводить комплексный анализ данных о подвижном составе и его окружении, выявлять закономерности и зависимости, прогнозировать поведение и потребности клиентов, а также принимать обоснованные решения на основе данных.

Интеллектуальные управляющие системы — это системы, которые используют алгоритмы искусственного интеллекта, машинного обучения и нейронных сетей для автоматизации и оптимизации процессов управления подвижным составом. Интеллектуальные управляющие системы позволяют реализовывать функции помощи машинисту, автономного вождения, адаптивного торможения, а также обеспечивать взаимодействие подвижного состава с инфраструктурой и другими участниками движения.

## 2. Опыт применения нейронных сетей и машинного зрения на железнодорожном транспорте

Нейросетевые технологии и технологии машинного зрения являются направлениями искусственного интеллекта, позволяющими создавать системы, способные обучаться на данных и распознавать образы, объекты, лица, речь и текст. Как и во многих других отраслях, нейронные сети и машинное зрение нашли применение на железнодорожном транспорте.

В 2019 году ОАО «РЖД» получило первый скоростной электропоезд «Ласточка», оборудованный системой машинного зрения и комплексом специализированных датчиков для получения информации об окружающей обстановке [3].

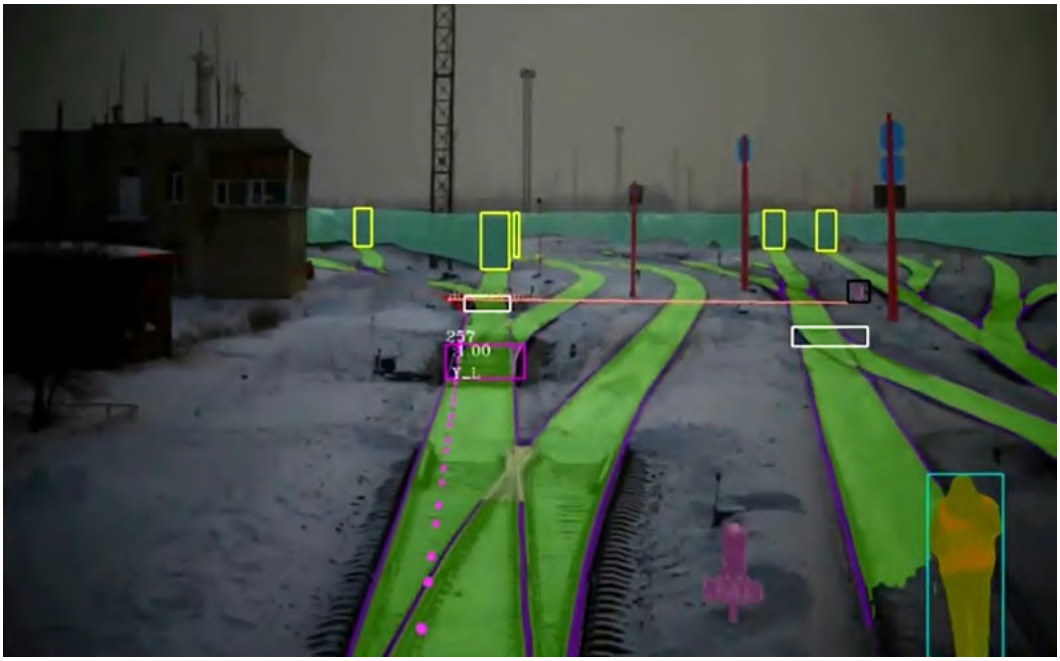


Рис. 1. Обнаружение объектов железнодорожного пути с помощью системы Cognitive Rail Pilot [5]

В состав электропоезда входит комплекс специализированных датчиков, включающий в себя видеокамеры, тепловизоры и лидары. Благодаря этим устройствам электропоезд может получать информацию об окружающей обстановке, что позволяет автоматически контролировать скорость и расстояние до других поездов, а также обеспечивать безопасность пассажиров. Эта технология является одной из инновационных разработок РЖД в области цифровизации транспортной отрасли.

В 2020 году был успешно протестирован прототип сервиса «Цифровой помощник маневрового диспетчера», использующий искусственные нейросети. Этот сервис может собирать и обрабатывать данные из информационных систем станции, формировать варианты роспуска вагонов и выбирать наиболее оптимальный [4]. Результаты тестирования показали, что нейросеть, обученная на примерах работы диспетчеров станции, успешно справляется с роспуском на уровне опытного специалиста. Это означает, что в будущем искусственный интеллект может стать заменой диспетчера в некоторых задачах, освобождая его от необходимости обрабатывать большое количество информации и повышая общее качество работы. Важно отметить, что искусственный интеллект продолжит развиваться благодаря самообучению.

Компания Cognitive Pilot (дочернее предприятие Сбера и Cognitive Technologies) 25 января 2022 года сообщила о начале серийного производства системы помощи машинисту маневрового железнодорожного локомотива на базе технологий искусственного интеллекта Cognitive Rail Pilot [5]. Благодаря использованию искусственного интеллекта и технического зрения, эти комплексы могут обнаруживать объекты на железнодорожных путях, такие как другие составы, стрелки, пути, люди, светофоры и др. (рис. 1). Это существенно снижает риски возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с человеческим фактором.

В данный момент интеллектуальные комплексы Cognitive Rail Pilot установлены на маневровых локомотивах ЧМЭ3. Система инициирует автоторможение по светофору, запрещающему положению пошерстной стрелки, по подъезду к

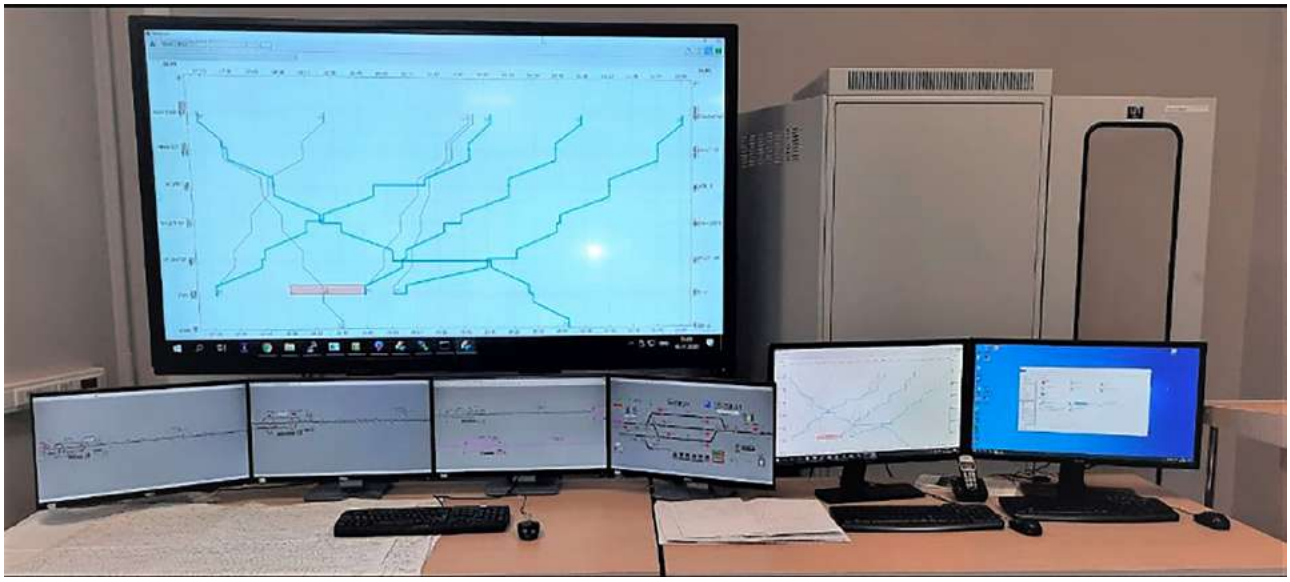


Рис. 2. Рабочее место диспетчера с ИСУДП «Прогноз» [7]

составу быстрее допуска или при препятствии на путях; высчитывает прогноз столкновения, траектории объектов, скорость поезда [3].

Компания планирует завершить дополнительный этап испытаний и установить Cognitive Rail Pilot на пассажирские поезда РЖД к 2024 году. Кроме того, планируется начать экспорт систем в зарубежные страны.

ИСУДП «Прогноз» — это многофункциональная интеллектуальная система прогнозирования, моделирования и оптимизации движения железнодорожного транспорта, в том числе с применением технологий анализа больших данных, разработанная российскими учеными из Центра компетенций НТИ «Искусственный интеллект» на базе МФТИ [6]. Система помогает диспетчерам принимать оперативные и эффективные решения в сложных и конфликтных ситуациях, а также формировать оптимальные и прогнозные графики движения. ИСУДП «Прогноз» повышает безопасность и качество железнодорожных перевозок, сокращает издержки и увеличивает пропускную способность магистралей. Рабочее место диспетчера представлено на рис. 2.

В 2022 году система была установлена в диспетчерском центре г. Алма-Аты на участке Жетыген — Алтынколь. При дальнейшем развитии система сможет в полной мере применяться для построения нормативных графиков движения, а также при интеграции с другими системами планировать оптимальную подвязку локомотивов к поездам, оптимально подбирать время для проведения ремонтных работ с наименьшими потерями для нормативного графика [8].

## 3. Краткая характеристика основных моделей для классификации и анализа изображений

Задача обнаружения объектов является одной из самых сложных и важных задач машинного зрения, так как она требует одновременно решать задачи классификации изображений (определение типа объекта) и локализации объектов (определение координат объекта).

Для решения задачи обнаружения объектов существует множество моделей нейронных сетей, которые можно разделить на две основные группы: одноуровневые (one-stage) и двухуровневые (two-stage) модели. Одноуровневые модели пытаются решить задачу детекции за один проход по изображению, предсказывая ограничивающие рамки и классы объектов для всех возможных областей

изображения. Двухуровневые модели сначала генерируют кандидаты в ограничивающие рамки (например, с помощью алгоритма региональных предложений), а затем уточняют их положение и класс с помощью отдельной нейронной сети.

Одноуровневые модели имеют преимущества в скорости работы и простоте реализации, но часто уступают двухстадийным моделям в точности детекции, особенно для маленьких или перекрывающихся объектов. Двухуровневые модели имеют преимущества в точности детекции и гибкости настройки, но требуют больше вычислительных ресурсов и времени для работы.

В этом разделе мы кратко охарактеризуем некоторые из самых популярных и эффективных моделей для детекции объектов на изображениях.

**R-CNN (Region-based Convolutional Neural Networks)** — модель, разработанная в 2014 году компанией Microsoft Research Asia.

Region-based означает использование моделью одноуровневого регионального подхода, то есть вместо обработки всего изображения сразу происходит его разделение на отдельные регионы. Как уже было сказано, такой подход повышает качество распознавания, но значительно понижает быстродействие, так как каждый регион прогоняется через вычислительно сложную сверточную нейронную сеть, что занимает довольно много времени.

В 2015 году той же компанией была выпущена Fast R-CNN, использующая одну и ту же сверточную нейронную сеть для извлечения признаков из всех регионов изображения, а не для каждого региона отдельно, как это делается в R-CNN.

В 2017 году компанией Facebook AI Research была выпущена Mask R-CNN, добавляющая возможность сегментации объектов на изображении, что позволяет получать более точную информацию о расположении объектов.

Все далее рассматриваемые модели являются двухуровневыми.

**EfficientNets** — семейство моделей нейронных сетей, разработанных компанией Google Brain в 2019 году. Модели достигают высоких результатов на задачах классификации изображений при меньшем количестве параметров, чем другие модели.

Сверточные слои с многомасштабной декомпозицией — это особенность EfficientNets, которая позволяет сети более эффективно использовать информацию изображения на разных масштабах. Для этого сверточные слои в EfficientNets разделяются на несколько подслоев с разными размерами ядра.

Основное преимущество EfficientNets заключается в их высокой эффективности по отношению к вычислительным затратам, что делает их особенно привлекательными для использования на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, таких как мобильные устройства и встроенные системы.

**YOLO (You Only Look Once)** — модель, разработанная в 2016 году Джозефом Редмоном и Али Ризой Фарди. Название дает понять, что алгоритм является одноуровневым, обрабатывая все изображение за один проход и выполняя классификацию и локализацию объектов одновременно. На момент выпуска модель демонстрировала отличную скорость обработки изображения в режиме реального времени со скоростью более 45 кадров в секунду на современном оборудовании.

С течением времени были разработаны новые версии YOLO, которые обладают большей скоростью и качеством распознавания. Последней на данный момент вышедшей версией является YOLOv8, выпущенная в начале 2023 года.

**VGG (Visual Geometry Group)** — семейство моделей, разработанное исследовательской группой Visual Geometry Group в Оксфордском университете в 2014 году.

VGG имеет очень глубокую архитектуру с 16–19 слоями свертки и полносвязанными сло-

ями, что позволяет ей извлекать более высокоуровневые признаки изображения, улучшая точность. При этом все сверточные слои имеют сравнительно малые фильтры размером 3 × 3, что позволяет использовать меньшее количество параметров и уменьшить вычислительную сложность модели, тем самым улучшая быстродействие.

VGG часто используется как основная модель для предобучения, которая может быть дообучена на других задачах, например в сетях YOLO для обнаружения объектов.

Существует несколько модификаций архитектуры VGG, которые различаются числом сверточных слоев и их конфигурацией. Например, VGG16, где 16 — количество сверточных слоев.

**ResNets** — это семейство нейронных сетей, использующих остаточные блоки для решения проблемы затухания градиента при обучении глубоких сетей, предложенные в 2015 году исследователями из Microsoft Research. Авторы также представили различные варианты ResNets с разной глубиной и шириной, такие как ResNet-18, ResNet-50 и другие.

ResNets имеют относительно небольшое количество параметров по сравнению с другими глубокими сетями. Например, ResNet-50 имеет около 25 миллионов параметров, в то время как VGG-16 имеет около 138 миллионов параметров.

Скорость и точность этой модели находятся на достаточно высоком уровне, так как она использует эффективные операции свертки и пакетной нормализации.

## 4. Алгоритм обнаружения посторонних объектов на пути следования подвижного состава с помощью системы технического зрения

Одной из актуальных задач, решаемых с помощью систем технического зрения на железных дорогах, является обнаружение препятствий и посторонних объектов на рельсах, которые могут создавать опасность для движения поездов. Эта задача особенно важна при увеличении скоростей движения поездов и роста пассажиропотока, когда машинисту бывает сложно правильно оценить сложившуюся ситуацию и принять оперативное решение.

**Первым этапом** алгоритма обнаружения является предобработка изображения. Изображения, могут быть зашумленными, размытыми, иметь низкое разрешение или недостаточное освещение, что еще больше усложняет и без того непростую задачу анализа изображения, понижая скорость и точность распознавания. Этот этап включает в себя такие операции, как:

*Сбор и хранение изображений с камер*. Изображения должны быть достаточно четкими и иметь хорошее освещение. Они должны быть сохранены в формате JPEG или PNG с разрешением не менее 640 × 480 пикселей.

*Нормализация изображений*. Для уменьшения влияния различий в освещении, контрасте и цвете изображений, а также для ускорения обработки изображений необходимо привести их к стандартному виду. В процессе нормализации изображением могут быть произведены следующие операции: преобразование изображений в оттенки серого, выравнивание гистограммы яркости, масштабирование изображений до одинакового размера, вычитание среднего значения пикселей по всему набору данных.

*Разметка изображений.* Для каждого изображения необходимо указать координаты ограничивающих прямоугольников (bounding boxes) вокруг посторонних объектов на рельсах, а также метки классов этих объектов (человек, транспортное средство, железнодорожная колея и т. д.). Разметку можно выполнять вручную с помощью специальных программ или автоматически с помощью алгоритмов компьютерного зрения. Разметка нужна для обучения и тестирования нейронной сети.

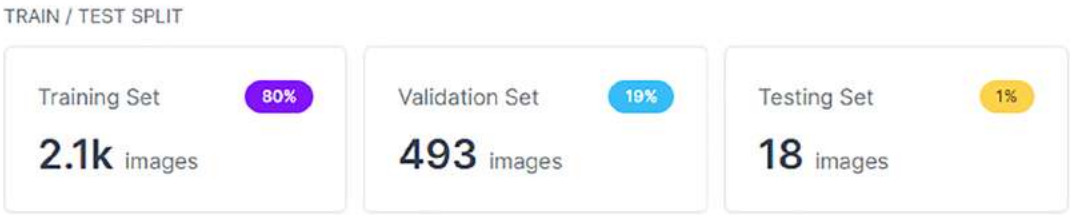



Рис. 3. Количественное разделение набора данных для обучения YOLOv8 [9]

*Аугментация изображений*. Для увеличения количества и разнообразия данных для обучения нейронной сети, а также для повышения ее устойчивости к различным искажениям изображений можно применять аугментацию изображений. Аугментация заключается в применении случайных преобразований к исходным изображениям, таких как поворот, сдвиг, отражение, изменение цвета, добавление шума и т. д. Аугментация позволяет симулировать различные ситуации, которые могут возникнуть в реальных условиях.

**Вторым этапом** алгоритма является обучение и тестирование нейронной сети, выполняющей задачу обнаружения посторонних объектов на рельсах. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

*Выбор архитектуры нейронной сети.* Существует множество различных архитектур нейронных сетей, подробнее о которых было рассказано выше. Для демонстрации работы алгоритма и более наглядного сравнения различий будут использоваться две модели с принципиально разными архитектурами: двухуровневая Mask R-CNN и одноуровневая YOLOv8.

*Подготовка данных для обучения и тестирования нейронной сети*. Для обучения и тестирования нейронной сети необходимо разделить набор данных на две части: обучающую и тестовую. Обучающая часть используется для настройки весов нейронной сети таким образом, чтобы минимизировать функцию потерь, которая измеряет разницу между предсказанными и истинными ограничивающими прямоугольниками и метками классов объектов. Тестовая часть используется для оценки качества работы нейронной сети на новых данных, которые не были использованы в процессе обучения. Обычно обучающая часть составляет около 80 % от всего набора данных, а тестовая — около 20 %. Для улучшения качества обучения можно также использовать валидационную часть данных, которая отделяется от обучающей части и используется для проверки результатов обучения на каждой эпохе (итерации).

Для обучения модели нейронной сети YOLOv8 нами был подготовлен набор из 2500 фотографий, содержащих классифицируемые объекты, такие как железнодорожная колея, люди, транспорт и т. д. На рис. 3 приведено количественное разделение этого набора данных на обучающую (Training Set), валидационную (Validation Set) и тестовую (Testing Set) части.

*Обучение нейронной сети.* Обучение нейронной сети заключается в настройке весов сверточных и полносвязных слоев таким образом, чтобы минимизировать функцию потерь на обучающих данных. Для этого используется алгоритм стохастического градиентного спуска, который итеративно обновляет веса в направлении антиградиента функции потерь. Для вычисления градиента функции потерь по весам используется метод обратного распространения ошибки (backpropagation).

Обучение нейронной сети может занимать много времени и требовать больших вычислительных ресурсов, особенно если сеть имеет множество слоев и фильтров. Для ускорения обучения и повышения качества распознавания используются различные техники, такие как:

• Использование предобученной нейронной сети. Вместо того, чтобы обучать нейронную сеть с нуля, можно использовать нейронную сеть, которая уже была обучена на большом наборе данных и дообучить ее на специфическом наборе данных для обнаружения посторонних объектов на рельсах. Это позволяет использовать знания, полученные на общих данных, для решения конкретной задачи. Для этого можно заморозить (не обновлять) веса сверточных слоев предобученной сети и обучать только полносвязные слои.

В связи с большой трудоемкостью самостоятельного обучения модели MASK R-CNN из-за ее математически сложного устройства будет использована предобученная модель, предоставленная разработчиками в открытый доступ на своей официальной странице в интернете.

• Использование пакетной нормализации (batch normalization) — метода, который позволяет повысить производительность и стабилизировать работу искусственных нейронных сетей. Суть данного метода заключается в том, что некоторым слоям нейронной сети на вход подаются данные, предварительно обработанные и имеющие нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию [10]. Это улучшает стабильность и скорость обучения, а также уменьшает переобучение.

• Использование метода исключения (dropout) — техники, характеризующей исключение определенного процента случайных нейронов на разных итерациях (эпохах) во время обучения нейронной сети [11]. Это предотвращает переобучение, так как заставляет сеть использовать различные комбинации признаков для классификации объектов.

*Тестирование нейронной сети*. После того, как нейронная сеть обучена на обучающих данных, необходимо проверить ее работу на тестовых данных, которые не были использованы в процессе обучения. Для этого подается изображение на вход сети и вычисляются выходы всех слоев. Последний слой сети выдает предсказанные ограничивающие прямоугольники и метки классов объектов на изображении. Формулы для расчета из [12]. Для оценки качества работы нейронной сети используются различные метрики, такие как:

• Доля правильных ответов (accuracy) — это доля правильно классифицированных объектов от общего числа объектов на изображении. Точность вычисляется по формуле (1):

$$\text{accuracy} = \frac{\text{TP}}{(\text{TP} + \text{FP} + \text{FN})}, \quad (1)$$

где TP — истинно положительные (true positive), то есть объекты, которые были правильно обнаружены и классифицированы;

FP — ложно положительные (false positive), то есть объекты, которые были ошибочно обнаружены или классифицированы;

FN — ложно отрицательные (false negative), то есть объекты, которые не были обнаружены или классифицированы.

• Полнота (recall) — это доля правильно обнаруженных объектов от общего числа реальных объектов на изображении. Полнота вычисляется по формуле (2):

$$\text{recall} = \frac{\text{TP}}{(\text{TP} + \text{FN})}. \quad (2)$$

• Точность (precision) — это доля правильно обнаруженных объектов от общего числа предсказанных объектов на изображении. Точность вычисляется по формуле (3):

$$\text{precision} = \frac{\text{TP}}{(\text{TP} + \text{FP})}. \quad (3)$$

• F-мера (F-measure) — это гармоническое среднее между точностью и полнотой, которое учитывает баланс между ними. F-мера вычисляется по формуле (4):

$$F-\text{measure} = \\ = 2\cdot\text{precision}\cdot\frac{\text{recall}}{(\text{precision}+\text{recall})}. \quad (4)$$

Для сравнения работы двух моделей на одинаковом наборе тестовых данных нами были подобраны 20 изображений железнодорожной инфраструктуры разной степени сложности. Изображения представляют из себя вид с ракурса съемки камеры технического зрения подвижного состава по ходу его движения и различаются погодными условиями, скоростью движения, качеством фокусировки и т. д. Исходное изображение представлено на рис. 4, обработанные нейронными сетями изображения — на рис. 5 и 6.

Так как модель YOLOv8 была дообучена на пользовательском наборе данных, мы имели возможность добавить еще один класс объектов для распознавания и сегментации, такой как рельсовая колея. Исходная модель MASK R-CNN не имеет этого класса, поэтому в дальнейшем расчете метрик качества работы он не будет учтен.

Расчет оценки качества работы нейронных сетей по формулам (1–4), обозначения по первым буквам (например, accuracy = $A$):

**Accuracy:**

Mask R-CNN: $A = \frac{65}{(65+15+17)} = 0,68.$

Yolov8: $A = \frac{69}{(69+3+15)} = 0,79.$

**Recall:**

Mask R-CNN: $R = \frac{65}{(65+17)} = 0,79.$

Yolov8: $R = \frac{69}{(69+15)} = 0,82.$

**Precision:**

Mask R-CNN: $P = \frac{65}{(65+15)} = 0,81.$

Yolov8: $P = \frac{69}{(69+3)} = 0,95.$

**F-measure:**

Mask R–CNN: $F = 2\cdot 0,81\cdot\frac{0,79}{(0,81+0,79)} = 0,79.$

Yolov8: $F = 2\cdot 0,95\cdot\frac{0,82}{(0,95+0,82)} = 0,88.$

Как видно из расчетов, MASK R-CNN уступает по всем показателям. Главной причиной этого является большое количество False Positive — ложно положительных объектов (в 5 раз больше, чем у конкурента). Это может быть исправлено добавлением специального параметра conf, позволяющего задать отображение рамок классификации по совпадению с определенным процентным значением.

**Третий этап** алгоритма заключается в оценке результатов работы нейронной сети на тестовых данных и анализе ее сильных и слабых сторон. Для этого можно использовать следующие методы:

*Визуализация предсказаний нейронной сети.* Для наглядного представления работы нейронной сети можно визуализировать предсказанные ограничивающие прямоугольники и метки классов на тестовых изображениях и сравнить их с истинными. Это позволяет увидеть, какие объекты нейронная сеть обнаруживает правильно, а какие нет, а также какие ошибки она допускает.

*Построение кривых обучения и валидации.* Для оценки процесса обучения нейронной сети можно построить графики зависимости функции потерь и метрик качества от номера эпохи (итерации) обу-

Рис. 4. Исходное изображение

Рис. 5. Изображение, обработанное MASK R-CNN

Рис. 6. Изображение, обработанное YOLOv8

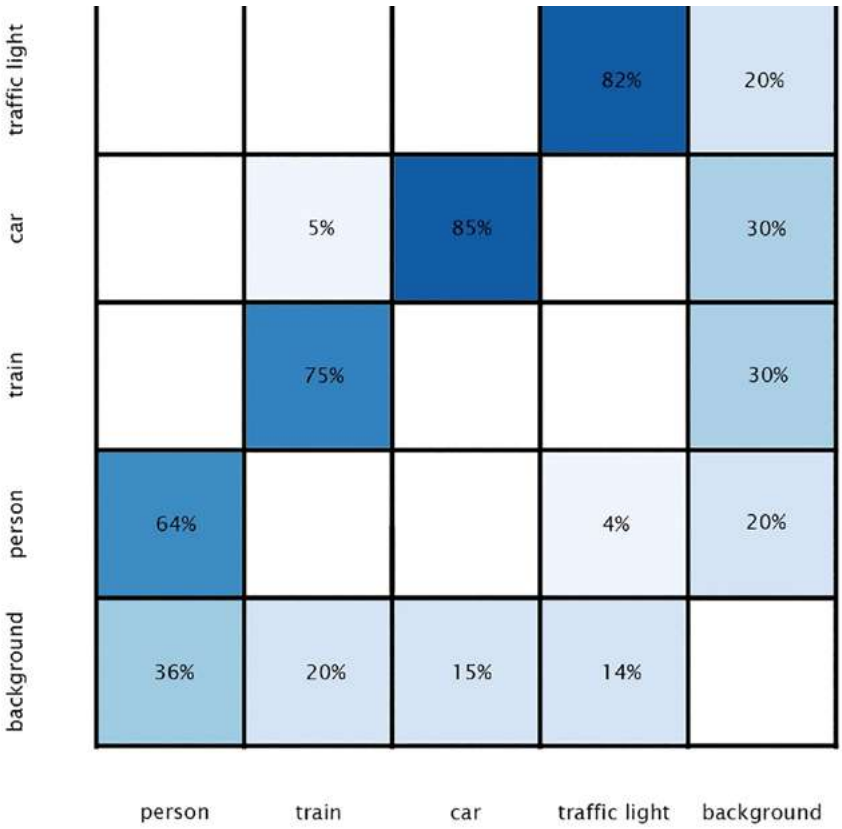



Рис. 7. Матрица ошибок для Mask R-CNN

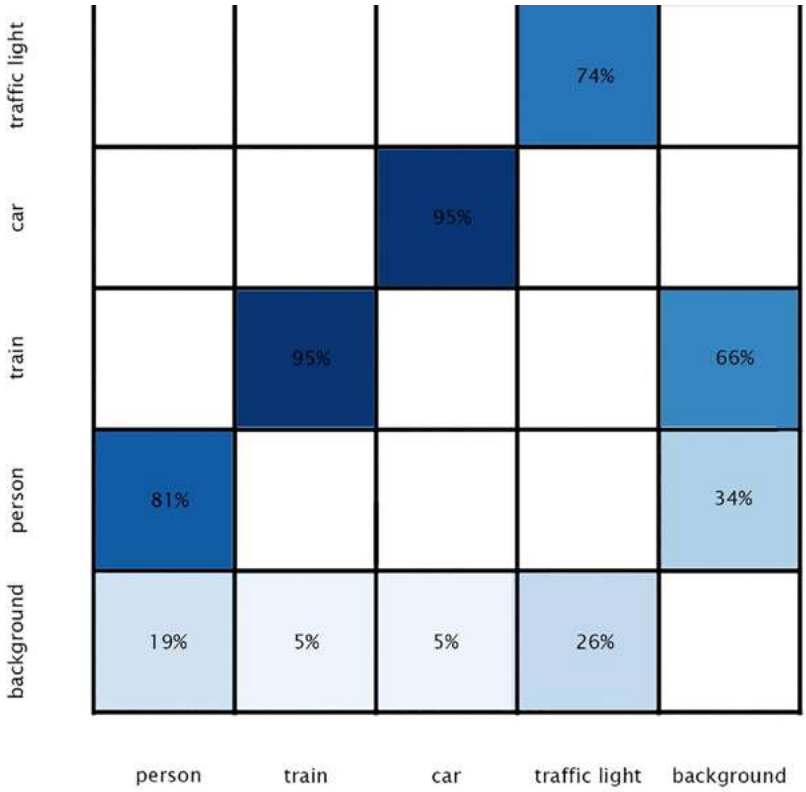



Рис. 8. Матрица ошибок для YOLOv8

чения на обучающих и валидационных данных. Это позволяет определить, насколько хорошо нейронная сеть обучается на данных, а также выявить признаки переобучения или недообучения.

*Построение матрицы ошибок (confusion matrix).* Матрица представляет из себя таблицу, которая позволяет визуализировать эффективность алгоритма классификации путем сравнения прогнозируемого значения целевой переменной с ее фактическим значением. Столбцы матрицы представляют наблюдения в прогнозируемом классе, а строки — наблюдения в фактическом классе (или наоборот) [13]. Например, на рис. 7 и 8 ниже показана матрица ошибок для четырех классов объектов:

## Заключение

Результаты, полученные в ходе работы, показывают, что внедрение технического зрения в паре с нейросетевыми технологиями являются эффективным инструментом обнаружения объектов железнодорожного транспорта, людей и препятствий на пути. Предложенные инструменты повышения безопасности в ближайшей перспективе смогут стать одним из элементов комплексной цифровой экосистемы безопасности на железнодорожном транспорте.

## Библиографический список

1. РЖД-Технологии. — URL: https://www.rzdtech.ru/ (дата обращения 21.03.2023).

2. Розенберг Е. Н. Цифровая экономика и цифровая железная дорога / В. И. Уманский, Ю. В. Дзюба // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2017. — С. 46. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-ekonomika-i-tsifrovaya-zheleznaya-doroga/viewer (дата обращения: 21.03.2023).

3. Машинное зрение на железнодорожном транспорте (РЖД): Cognitive Rail Pilot. — URL: https://rzddigital.ru/technology/mashinnoe-zrenie/ (дата обращения: 23.03.2023).

4. Искусственные нейронные сети на железнодорожном транспорте (РЖД): цифровой помощник маневрового диспетчера, Cognitive Rail Pilot. — URL: https://rzddigital.ru/technology/iskusstvennye-neyronnye-seti/.

5. Cognitive Rail Pilot. — URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Cognitive_Rail_Pilot?ysclid=lfwl90xh5o174644139_tadviser.ru.

6. ИСУДП «Прогноз». — URL: https://pt.2035.university/project/isudp-prognoz.

7. Система оптимизации движения ж/д транспорта «Прогноз». — URL: https://ai.mipt.ru/projects/sistema_optimizatsii_dvizheniya_zh_d_transporta_prognoz.

8. Расписание за 5 секунд: как нейросеть оптимизирует движение ж/д транспорта. — URL: https://itnan.ru/post.php?c=1&p=670530.

9. Roboflow. — URL: https://app.roboflow.com/.

10. Batch-normalization. — URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization.

11. Исключение (нейронные сети). — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Исключение_(нейронные_сети).

12. Метрики в задачах машинного обучения. — URL: https://habr.com/ru/company/ods/blog/328372/.

13. Матрица ошибок. — URL: https://help.sap.com/docs/SAP_PREDICTIVE_ANALYTICS/41d1a6d4e7574e32b815f1cc87c00f42/9c144a376f004058b4e9fe56727359af.html?version=3.2.

Дата поступления: 30.05.2023
Решение о публикации: 16.05.2023

**Контактная информация:**
СЫЧУГОВ Антон Николаевич — ст. преподаватель; sychugov@pgups.ru
МИХЕЙЧИКОВ Вадим Николаевич — обучающийся; mihei4ikov@mail.ru
ЧЕРНЫШОВ Максим Витальевич — обучающийся; mxchrnshv@yandex.ru

# Application of Neural Networks for Object Recognition in Railway Transportation

**A. N. Sychugov, V. N. Mikheychikov, M. V. Chernyshov**

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

**For citation:** Sychugov A. N., Mikheychikov V. N., Chernyshov M. V. Application of Neural Networks for Object Recognition in Railway Transportation // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 478–491. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-478-491

**Summary**
**Purpose:** With the help of vision systems and neural networks, such as YOLOv8 and MASK R-CNN, it is possible to quickly and accurately detect objects that can lead to an accident or delay trains. YOLOv8 is one of the most popular real-time object detection algorithms that uses deep neural networks to classify and localize objects. YOLOv8 can detect objects in images and videos with high speed and accuracy. This model can work on various hardware platforms, including mobile devices and computers. MASK R-CNN is an even more advanced object detection algorithm that has the ability to highlight objects and their contours with high accuracy. MASK R-CNN uses convolutional neural networks and mask segmentation techniques to detect objects. It can work both in real time and on static images. When vision systems are equipped with YOLOv8 and MASK R-CNN neural networks, they can quickly respond to extraneous objects that appear on the rails. The purpose of the article is to develop algorithms for detecting railway transport objects and obstacles using technical vision and neural networks, and to evaluate the effectiveness of algorithms. **Methods:** The YOLOv8 algorithm is based on the architecture of convolutional neural networks and uses supervised learning methods. This model takes an image as input and provides estimates of the probability that a certain object is present in the image in real time. To achieve this, YOLOv8 employs region of interest (ROI) detection methods, allowing to determine the areas of the image on which objects may be located. The MASK R-CNN algorithm uses more sophisticated methods, such as mask segmentation methods and proportional resizing of the area of interest (RoIAlign) to achieve more accurate results of object detecting in images and videos. It is also based on convolutional neural networks and uses supervised learning methods. MASK R-CNN uses mask segmentation methods to determine the contour of an object in an image, as well as the RoIAlign method, which allows for superior quality when processing various image sizes. Common mathematical methods that are used in YOLOv8 and MASK R-CNN are methods of convolutional neural network, supervised learning and optimization of the loss function. They are based on deep learning algorithms such as stochastic gradient descent and backward propagation of errors. **Results:** An algorithm for detecting foreign objects on the route of rolling stock using a technical vision system, calculation of the evaluation of the quality of neural networks performance, error matrices have been formed, the results of neural network processing have been obtained. **Practical significance:** An algorithm for detecting foreign objects on the route of the moving rolling stock using a technical vision system has been developed, two neural networks have been trained to detect railway transport objects and obstacles on the way.

**Keywords:** Neural network, digital technologies, rolling stock, algorithm, technical vision.

## References

1. *RZhD-Tekhnologii* [RZD-Technologies]. Available at: https://www.rzdtech.ru/ (accessed: March 21, 2023). (In Russian)

2. Rozenberg E. N., Dzyuba Yu. V. Tsifrovaya ekonomika i tsifrovaya zheleznaya doroga [Digital economy and digital railway]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation.

Journal of science, practice, economics]. 2017, p. 46. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-ekonomika-i-tsifrovaya-zheleznaya-doroga/viewer (accessed: March 21, 2023). (In Russian)

3. *Mashinnoe zrenie na zheleznodorozhnom transporte (RZhD): Cognitive Rail Pilot* [Machine vision in railway transport (RZD): Cognitive Rail Pilot]. Available at: https://rzddigital.ru/technology/mashinnoe-zrenie/ (accessed: March 23, 2023). (In Russian)

4. *Iskusstvennye neyronnye seti na zheleznodorozhnom transporte (RZhD): tsifrovoy pomoshchnik manevrovogo dispetchera, Cognitive Rail Pilot* [Artificial neural networks in railway transport (RZD): digital assistant to the shunting dispatcher, Cognitive Rail Pilot]. Available at: https://rzddigital.ru/technology/iskusstvennye-neyronnye-seti/. (In Russian)

5. Cognitive Rail Pilot. Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:Cognitive_Rail_Pilot?ysclid=lfwl90xh5o174644139_tadviser.ru.

6. *ISUDP "Prognoz"* [ISUDP "Forecast"]. Available at: https://pt.2035.university/project/isudp-prognoz. (In Russian)

7. *Sistema optimizatsii dvizheniya zh/d transporta "Prognoz"* [The system for optimizing the movement of railway transport "Prognoz"]. Available at: https://ai.mipt.ru/projects/sistema_optimizatsii_dvizheniya_zh_d_transporta_prognoz. (In Russian)

8. *Raspisanie za 5 sekund: kak neyroset' optimiziruet dvizhenie zh/d transporta* [Schedule in 5 seconds: how a neural network optimizes the movement of railway transport]. Available at: https://itnan.ru/post.php?c=1&p=670530. (In Russian)

9. Roboflow. Available at: https://app.roboflow.com/.

10. Batch-normalization. Available at: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Batch-normalization.

11. *Isklyuchenie (neyronnye seti)* [Exception (neural networks)]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Isklyuchenie_(neyronnye_seti). (In Russian)

12. *Metriki v zadachakh mashinnogo obucheniya* [Metrics in machine learning problems]. Available at: https://habr.com/ru/company/ods/blog/328372/. (In Russian)

13. *Matritsa oshibok* [Matrix of errors]. Available at: https://help.sap.com/docs/SAP_PREDICTIVE_ANALYTICS/41d1a6d4e7574e32b815f1cc87c00f42/9c144a376f004058b4e9fe56727359af.html?version=3.2. (In Russian)

Received: May 16, 2023
Accepted: May 30, 2023

**Author's information:**
Anton N. SYCHUGOV — Senior Lecturer;
sychugov@pgups.ru
Vadim N. MIKHEYCHIKOV — Student;
mihei4ikov@mail.ru
Maxim V. CHERNYSHOV — Student;
mxchrnshv@yandex.ru

УДК 528.024

# Опыт применения цифровых нивелиров и программного обеспечения CREDO НИВЕЛИР для мониторинга инженерных сооружений

**Н. В. Канашин, Д. А. Афонин**

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

**Для цитирования:** *Канашин Н. В., Афонин Д. А.* Опыт применения цифровых нивелиров и программного обеспечения CREDO НИВЕЛИР для мониторинга инженерных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 492–500. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-492-500

## Аннотация

**Цель:** Изложение опыта работы цифровыми нивелирами на строительной площадке при многолетнем контроле осадок как строящихся, так и эксплуатируемых инженерных сооружений в условиях сжатости сроков, значительном объеме работ, ограниченности ресурсов и неблагоприятных условиях наблюдений с одновременной необходимостью их выполнения с высокой точностью. **Методы:** Теория ошибок измерений, метод наименьших квадратов, параметрический способ уравнивания. **Результаты:** Показано, что цифровые нивелиры различных производителей хотя и применяются для решения различных геодезических задач, а исследованиям влияния различных факторов на точность получаемого ими результата посвящены работы многих авторов, но в реальных условиях производства ряд таких факторов исключить невозможно, что приводит к ухудшению точности результатов нивелирования. Выработаны практические рекомендации математической обработки построенных цифровыми нивелирами нивелирных сетей в программной среде CREDO НИВЕЛИР, предложены нестандартные типы осадочных марок с указанием методики выполнения наблюдений при их использовании. На основе известной зависимости угла $i$ цифрового нивелира от температуры окружающей среды предложена оригинальная методика его определения, в том числе в условиях выхода полученного значения за пределы его компенсации программным обеспечением нивелира. Показано, что полученные на основе опыта работы с цифровыми нивелирами выводы позволяют при контроле осадок инженерных сооружений повысить точность таких работ, а также снизить их трудоемкость. **Практическая значимость:** Изложенные в статье выводы и результаты получены на основе многолетнего контроля осадок как строящихся, так и эксплуатируемых инженерных сооружений и могут быть реализованы при инженерно-геодезическом обеспечении строительства.

**Ключевые слова:** Мониторинг, контроль осадок, цифровые нивелиры, геодезическое обеспечение строительства, нивелирование.

## Введение

Цифровые нивелиры различных производителей сегодня широко распространены в геодезической практике при выполнении различных работ [1–7], а исследованиям влияния различных факторов на точность получаемого ими результата посвящены работы многих авторов [8–16]. Однако, на наш взгляд, большинство исследований по этой теме имеют узкую область применения, не учитывают в большинстве случаев невозможность исключения в условиях геодезического обеспечения строительства некоторых факторов, оказывающих влияние на точность измерений превышений цифровыми нивелирами (освещен-

*а*

*б*

Рис. 1. Примеры стандартных марок, применяемых для контроля деформаций:
*а* — самораспорный анкерный болт; *б* — цельностальная деталь, закрепляемая химическим анкером

*а*

*б*

Рис. 2. Использование крючков в качестве осадочных марок:
*а* — Общий вид; *б* — установка рейки для наблюдений

ности, пыли и иных), а также не дают практических рекомендаций математической обработки выполненных цифровыми нивелирами измерений в современных программных продуктах. Поэтому цель настоящей статьи — изложение опыта работы с цифровыми нивелирами и программным обеспечением при мониторинге деформаций строящихся или эксплуатируемых инженерных сооружений и выработка практических рекомендаций его выполнения в условиях сжатости сроков, значительном объеме работ, ограниченности ресурсов и неблагоприятных условиях наблюдений с одновременной необходимостью их выполнения с высокой точностью.

## Методы и материалы

Изложенные ниже рекомендации выработаны на основе многолетнего контроля осадок как строящихся (стадион «G-Drive Арена», г. Омск, физкультурно-оздоровительный комплекс «Центр художественной гимнастики», г. Сочи), так и эксплуатируемых (стадионы «Ростов Арена»,

г. Ростов-на-Дону, «Солидарность Самара Арена», г. Самара, «Калининград», г. Калининград) сооружений. Контроль осадок на всех указанных объектах выполняли по программе II класса точности измерений согласно ГОСТ [17] цифровым нивелиром Trimble Dini-03 и инварной рейкой типа LD-12.

Одной из общих для всех указанных объектов особенностью являлась невозможность установки в ряде контролируемых узлов стандартных марок — анкеров, закрепляемых в нижней части контролируемого элемента конструкции (например, показанных на рис. 1), что было связано с необходимостью контроля прогибов и осадок балок и плит перекрытий, а также эстетическими требованиями заказчика.

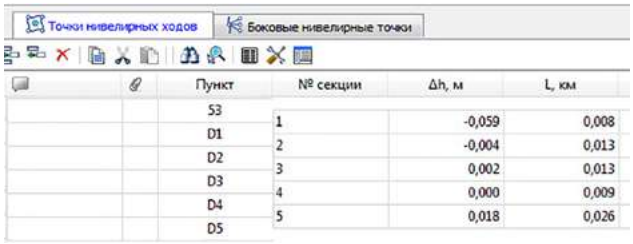
В таких случаях в качестве осадочных марок применяли металлические крючки, закрепляемые в контролируемом узле так, чтобы обеспечить возможность подвеса инварной рейки с помощью ответного крючка, закрепляемого в магните и устанавливаемого на тыльной стороне рейки (рис. 2). Такой вариант позволяет отказаться от использования отрицательных отсчетов по рейке и ускорить процесс наблюдений, а также закрепить марки в малозаметных местах.

Двухгодичный опыт контроля осадок с помощью таких марок показал, что их применение не оказывает существенного влияния на точность измерений, а применение однотипных крючков различных производителей приводит к изменению отсчетов, не превышающих 0,2–0,3 мм.

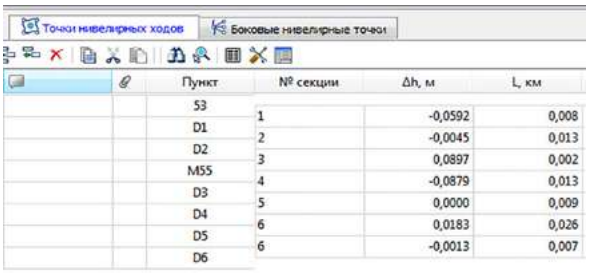
На некоторых из рассматриваемых объектов такой способ в силу требований заказчика к невозможности закрепления марок в теле конструкции и необходимости обеспечения их малозаметности был невозможен, в силу чего использовали пленочные отражатели малого размера, закрепляемые в труднодоступных местах у плинтуса или галтели помещения. Очевидно, что их использование неизбежно приводит к уменьшению точности измерений в силу неоднозначности установки на них рейки, особенно в указанных условиях — при отсутствии оптической видимости центра отражателя. Полностью исключить этот фактор нельзя, однако возможно ослабить его влияние путем установки рейки не на центр, а на ребро отражателя (рис. 3). Опыт работ с помощью такого типа марок показал, что предельная ошибка определения их отметок в различных циклах наблюдений не превышает 1 мм.

Рис. 3 Установка рейки на ребро пленочного отражателя

При выполнении работ в разное время года наблюдения одновременно приходится выполнять при различных температурах (например, на улице и внутри сооружения), при этом их разность, особенно в зимних условиях, может достигать более 40 °С. Учитывая зависимость угла $i$ цифрового нивелира от температуры окружающей среды [10, 12], а также невозможность в ряде случаев соблюдения равенства плеч при




*а*




*б*

Рис. 4. Изменение геометрии хода в программе CREDO Нивелир:
*а* — исходная геометрия хода; *б* — ход с добавленной узловой точкой (осадочная марка M55)

работе внутри строящегося сооружения, таким перепадом температур пренебрегать нельзя, что вынуждает выполнять поверку главного условия нивелира несколько раз в день, каждый раз перед ее началом выдерживая нивелир до принятия им температуры условий наблюдений.

Интервал времени, необходимый для выполнения этого условия, в нормативных документах, например инструкции [18], постоянен и равен 45 минутам. Однако опыт работ показал, что в зависимости от условий наблюдений и разности температур он может быть и больше. Поэтому на рассматриваемых объектах этот интервал каждый раз определяли опытным путем, выдерживая прибор в течение 45 минут, после чего тремя приемами выполняя поверку главного условия, учитывая рекомендации работы [12] — после каждого приема контролируя динамику изменения угла *i* (у нивелира Dini-03 при охлаждении инструмента он уменьшается), учитывая, что средняя скорость изменения угла у указанного нивелира *i* составляет 0,3» на 1 °C изменения температуры. Поверку считали выполненной, когда угол *i* переставал уменьшаться при охлаждении прибора (при нагревании увеличиваться), а его расхождение между приемами не превышало 2»–3».

Необходимо отметить, что нивелир Dini-03 позволяет программно учитывать поправку за угол *i* только в том случае, когда его значение не превышает 100». Однако на практике встречались такие случаи, когда указанный угол превышал эту величину — например, при выполнении наблюдений прибором, изначально имеющим близкое к предельному значение угла *i*. Учитывая, что само значение искомого угла вычисляется и выводится на дисплей прибора его программным обеспечением, а расстояние до рейки в процессе наблюдений измеряется, поправку за невыполнение главного условия в таких ситуациях вычисляли и вводили в измеренные превышения в камеральных условиях в среде *Microsoft Excel*.

Для измерения превышений на всех рассматриваемых объектах прокладывали систему нивелирных ходов от глубинных грунтовых реперов. Математическую обработку измерений выполняли в программе CREDO Нивелир, опыт работы с которой позволил выявить особенности, которые необходимо учитывать не только при камеральных, но и полевых работах.

Так, в текущей версии программы, в отличие от CREDO DAT, не реализован процесс автоматического распознавания узловых точек хода, когда наблюдения хотя бы на одну из них выполнены в режиме «Промежуточные измерения». Конечно, при наблюдениях за осадками с целью контроля измерений и получения оценки их точности нивелирные ходы стремятся прокладывать по осадочным маркам. Однако при существенном их количестве это приводит к увеличению трудозатрат. Кроме того, при выполнении измерений внутри строящегося

**Оценка качества уравнивания:**

Этап успешно завершен.

Построение ковариационной матрицы...

**Априорные характеристики (до уравнивания):**
Доверительная вероятность: $\alpha = 0{,}683$
СКО единицы веса: $\mu_0 = 1.000$

**Апостериорные характеристики (по результатам уравнивания):**
Число избыточных измерений (степеней свободы): $r = 20$
СКО единицы веса: $\mu = 1{,}008$

**$\chi^2$-контроль:**
Тест выполняется: $0{,}830 \le \mu \le 1{,}145$
- Ход № 4 (RP2, U1, ... , RP1) - недопустимая невязка хода - -0,0022 м, допустимая невязка - 0,0016 м.
- Ход № 9 (RP3, R1, ... , M85) - недопустимая невязка хода - -0,0008 м, допустимая невязка - 0,0007 м.
- Ход № 11 (CM11.8, O1, ... , M99) - недопустимая невязка хода - -0,0008 м, допустимая невязка - 0,0006 м.

Рис. 5. Протокол уравнивания нивелирной сети в программе CREDO Нивелир

сооружения условия наблюдений в каждом цикле различны, что вынуждает изменять их программу, заранее составить которую невозможно. Это заставляет выполнять измерения на узловые точки хода не только в режиме «Нивелирный ход», но и в режиме «Промежуточные измерения», а игнорирование узловых точек при математической обработке таких измерений приводит к искаженным результатам. Поэтому в таких ситуациях изменяли геометрию хода, добавляя нераспознанный узел в качестве точки хода, вычисляя превышение и плечо нивелирования на основе предварительно вычисленных отметок и измеренных расстояний до реек (рис. 4).

Выполнение измерений цифровым нивелиром Trimble Dini-03 в комплекте с одной инварной рейкой, как показал опыт, позволяет получать высокоточные измерения — фактические невязки в ходах нивелирования при выполнении мониторинга обычно существенно ниже установленных инструкцией [18] даже для I класса. При уравнивании таких измерений апостериорная средняя квадратическая ошибка единицы веса существенно меньше единицы. Изменением априорных значений ошибок измерений превышений это исправляется, однако из-за одновременного изменения допусков невязок их значения оказываются выше допустимых, что отражается в протоколе уравнивания (рис. 5).

На наш взгляд, в таких ситуациях приоритетным является значение апостериорной ошибки единицы веса, характеризующей корректность весов измерений и, как следствие, влияющей на качество уравнивания. Недопустимость невязок отдельных ходов является в некоторой мере искусственной и не влияющей на корректность конечного результата.

Еще одной особенностью работы CREDO Нивелир является зависимость значений исходных данных в таблице «Пункты ПВО» от результатов нивелирования. Так, при формировании нивелирных ходов в условиях наличия одноименных пунктов в указанной таблице и файле цифрового нивелира программа изменяет отметки имеющихся исходных пунктов в таблице в соответствии с их значениями в файле, что при невнимательности может приводить к неверным вычислениям. Заметим, что подобного неудобства нет в других продуктах компании, например CREDO DAT или CREDO Транскор, — там значения координат и высот исходных пунктов остаются неизменными при любом виде импорта, а при конфликте имен возникает соответствующий запрос.

## Результаты

Применение отмеченных приемов при контроле осадок инженерных сооружений позволило обеспечить требования заказчика, выполнить работы с заданной точностью, а также снизить их трудоемкость. Следует, однако, отметить, что достижение такого результата было бы невозможным без соблюдения известных правил геодезических измерений и вычислений: избегания установки нивелирного башмака и штатива на асфальт или обледенелые части строящегося сооружения, контроля запыленности осадочных марок перед установкой рейки, записи значений измерений на один разряд выше, чем это необходимо в конечном результате для снижения влияния ошибок округлений и иных.

## Заключение

Современные цифровые нивелиры при соблюдении должных требований обеспечивают высокую точность измерений и позволяют пользователю использовать различные способы решения нестандартных задач при мониторинге инженерных сооружений, поэтому изложенные в статье приемы не являются единственно возможными.

## Библиографический список

1. Скрипников В. А. Опыт применения цифрового нивелира DiNi03 при выполнении повторного высокоточного гидротехнического нивелирования / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь — 2013. IX Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). — Новосибирск: СГГА, 2013. — Т. 3. — С. 189–192.

2. Beshr Ashraf A. A. Investigating the accuracy of digital levels and reflectorless total stations for purposes of geodetic engineering / Ashraf A. A. Beshr, Islam M. Abo Elnaga // Alexandria Engineering Journal. — 2011. — Iss. 50. — Pp. 399–405.

3. Sargazakova S. S. Application of electronic levels and impact of their accuracy on construction measurements / S. S. Sargazakova, M. D. Kudabayev, A. A. Sargazakov et al. // The herald of Kyrgyz state university of construction, transport and architecture named after N. Isanov — 2020. — Iss. 3(69). — Pp. 344–349.

4. Илюхин Д. А. Применение цифровых нивелиров для наблюдения за осадками сооружений / Д. А. Илюхин // Записки горного института. — 2012. — Т. 196 — С. 65–67.

5. Рябова Н. М. Исследование и совершенствование методики нивелирования I и II классов с применением цифровых нивелиров: дисс. … канд. техн. наук / Н. М. Рябова. — Новосибирск, 2013. — 176 с.

6. Уставич Г. А. Совершенствование технологии геометрического инженерно-геодезического нивелирования цифровыми нивелирами / Г. А. Уставич // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2014 — № 32 — С. 206–210.

7. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов принаблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики / А. В. Никонов // Вестник СГГА. — 2013. — Вып. 4(24). — С. 12–18.

8. Новоселов Д. Б. Исследование работы высокоточного цифрового нивелира в условиях недостаточной освещенности / Д. Б. Новоселов, Б. А. Новоселов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь — 2013. IX Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). — Новосибирск: СГГА, 2013. — Т. 1. — С. 117–121.

9. Уставич Г. А. Методика проведения внеочередной поверки системы «цифровой нивелир + штрихкодовая рейка» / Г. А. Уставич, Х. К. Ямбаев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2013. — № 3. — С. 8–13.

10. Рябова Н. М. Исследование величины изменения угла i цифрового нивелира в зависимости от изменения температуры / Н. М. Рябова, И. Н. Чешева, Г. В. Лифашина // Вестник СГГА. — 2013. — Вып. 4(24). — С. 19–24.

11. Уставич Г. А. Исследование штрих-кодовых реек цифровых нивелиров / Г. А. Уставич и др. // Вестник СГГА. — 2010. — Вып. 2(13). — С. 3–8.

12. Никонов А. В. Влияние перепадов температуры окружающей среды на главное условие цифрового нивелира при наблюдениях за осадками фундаментов зданий и сооружений / А. В. Никонов, И. Н. Чешева, Г. В. Лифашина // Вестник СГГА. — 2016. — Вып. 2(34). — С. 24–33.

13. Gučevič J. Determining temperature dependence of collimation error of digital level Leica DNA 03 / J. Gučevič, S. Delčev, V. Ogrizovič // TS08E Engineering Surveying — Equipment. FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures. Marrakech, Morocco, 18–22 May 2011.

14. Уставич Г. А. Исследование влияния рефракции на результаты нивелирования цифровыми нивелирами / Г. А. Уставич, Е. Л. Соболева, Н. М. Рябова и др. // Геодезия и картография. — 2011. — № 5. — С. 3–9.

15. Новоселов Д. Б. Исследование работы высокоточного цифрового нивелира в условиях недостаточной освещенности / Д. Б. Новоселов, Б. А. Новоселов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь — 2013. IX Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). — Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. — С. 117–121

16. Калинченко И. С. Исследование влияния природно-климатических факторов на точность геодезических измерений превышений цифровым нивелиром Trimble DiNi12 / И. С. Калинченко, А. И. Уваров // Вестник ОмГАУ. — 2012. — № 4(8). — С. 49–53.

17. Межгосударственный стандарт ГОСТ 24846—2012. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. — М.: Стандартинформ, 2019. — 19 с.

18. ГКИНП (ГНТА)-03-010-03. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. — М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 2004. — 244 с.

Дата поступления: 10.03.2023
Решение о публикации: 04.04.2023

**Контактная информация:**
КАНАШИН Николай Владимирович — канд. техн. наук, доц.; nikolay_kanashin@ mail.ru
АФОНИН Дмитрий Андреевич — канд. техн. наук, доц.; Afonin83@yandex.ru

## Experience in the Use of Digital Levels and CREDO NIVELIR Software for Monitoring Engineering Structures

**N. V. Kanashin, D. A. Afonin**

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

**For citation:** Kanashin N. V., Afonin D. A. Experience in the Use of Digital Levels and CREDO NIVELIR Software for Monitoring Engineering Structures // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 492–500. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-492-500

### Summary
**Purpose:** To present the experience of working with digital levels at a construction site during long-term settlement monitoring settlement of both engineering structures under construction and in operation in conditions of tight time constraints, a significant amount of work, limited resources and adverse observation conditions with the simultaneous need to perform them with high accuracy. **Methods:** Theory of measurement errors, least squares method, parametric adjustment method. **Results:** It is shown that digital levels of various manufacturers, although they are used to solve various geodetic problems, and the work of many authors is devoted to the study of the influence of various factors on the accuracy of the result obtained by them, but in real

production conditions a number of such factors cannot be excluded, which leads to a deterioration in the accuracy of the leveling results. Practical recommendations for mathematical processing of leveling networks built by digital levels in the CREDO NIVELIR software environment are developed, non-standard types of settlement marks are proposed with an indication of the methodology for performing observations when using them. Based on the known dependence of the tilt angle of the digital level on the ambient temperature, an original method for its determination is proposed, including situations when the obtained value exceeds its compensation limits by the level software. It is shown that the conclusions obtained on the basis of the experience of working with digital levels make it possible to increase the accuracy of such work, as well as reduce their labor intensity, when monitoring the settlement of engineering structures. **Practical significance:** The conclusions and results presented in the article have been obtained on the basis of long-term control of the settlement of both engineering structures under construction and in operation and can be implemented by engineering and geodetic construction support.

**Keywords:** Monitoring, settlement control, digital levels, geodetic construction support, leveling.

## References

1. Skripnikov V. A., Skripnikova M. A. *Opyt primeneniya cifrovogo nivelira DiNi03 pri vypolnenii povtornogo vysokotochnogo gidrotekhnicheskogo nivelirovaniya. Interekspo GEO-Sibir' — 2013. IH Mezhdunar. nauch. kongr.: Mezhdunar. nauch. konf. "Geodeziya, geo-iformatika, kartografiya, markshejderiya": sb. materialov v 3 t. (Novosibirsk, 15–26 aprelya 2013 g.)* [Experience of using the DiNi03 digital level when performing repeated high-precision hydraulic leveling. Interexpo GEO-Siberia — 2013. IX Intern. scientific Congr.: Intern. scientific conf. "Geodesy, geoinformatics, cartography, mine surveying": compilation materials in 3 volumes (Novosibirsk, April 15–26, 2013)]. Novosibirsk: SGGA Publ., 2013, vol. 3, pp. 189–192. (In Russian)

2. Beshr Ashraf A. A., Elnaga Islam M. Abo Investigating the accuracy of digital levels and reflectorless total stations for purposes of geodetic engineering. Alexandria Engineering Journal, 2011, Iss. 50, pp. 399–405.

3. Sargazakova S. S., Kudabayev M. D., Sargazakov A. A. et al. Application of electronic levels and impact of their accuracy on construction measurements. The herald of Kyrgyz state university of construction, transport and architecture named after N. Isanov. 2020, Iss. 3(69), pp. 344–349.

4. Ilyuhin D. A. Primenenie cifrovyh nivelirov dlya nablyudeniya za osadkami sooru-zhenij [The use of digital levels for monitoring the settlements of structures]. *Zapiski gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. 2012, vol. 196, pp. 65–67. (In Russian)

5. Ryabova N. M. *Issledovanie i sovershenstvovanie metodiki nivelirovaniya I i II klassov s primeneniem cifrovyh nivelirov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Research and improvement of the method of leveling I and II classes using digital levels: diss. … cand. tech. Sciences]. Novosibirsk, 2013, 176 p. (In Russian)

6. Ustavich G. A. Rahymberdina Sovershenstvovanie tekhnologii geometricheskogo inzhe-nernogeodezicheskogo nivelirovaniya cifrovymi nivelirami [Improving the technology of geometric engineering and geodetic leveling with digital levels]. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosu-darstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova* [Proceedings of the Kyrgyz State Technical University. I. Razzakova]. 2014, Iss. 32, pp. 206–210. (In Russian)

7. Nikonov A. V. Osobennosti primeneniya sovremennyh geodezicheskih priborov pri nablyudenii za osadkami i deformaciyami zdanij i sooruzhenij ob"ektov energetiki [Features of the use of modern geodetic instruments in monitoring precipitation and deformation of buildings and structures of energy facilities]. *Vestnik SGGA* [Vestnik SSGA]. 2013, vol. 4(24), pp. 12–18. (In Russian)

8. Novoselov D. B., Novoselov B. A. *Issledovanie raboty vysokotochnogo tsifrovogo nivelira v usloviyakh nedo-statochnoy osveshchennosti. Interekspo GEO-Sibir' — 2013. IKh Mezhdunar. nauch. kongr.: Mezhdunar. nauch. konf. "Geodeziya, geoinformatika, karto-grafiya, marksheyderiya": sb. materialov v 3 t. (Novosibirsk, 15–26 aprelya 2013 g.)* [Study of the operation of a high-precision digital level in low light conditions.

Interexpo GEO-Siberia — 2013. IX Intern. scientific Congr.: Intern. scientific conf. “Geodesy, geoinformatics, cartography, mine surveying”: compilation materials in 3 volumes (Novosibirsk, April 15–26, 2013)]. Novosibirsk: SGGA Publ., 2013, vol. 1, pp. 117–121. (In Russian)

9. Ustavich G. A., YAmbaev H. K. Metodika provedeniya vneocherednoj poverki sistemy “cifrovoj nivelir+ shtrihkodovaya rejka” [Methodology for extraordinary verification of the “digital level + barcode rail” system]. *Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotos”emka* [Izv. universities. Geodesy and aerial photography]. 2013, Iss. 3, pp. 8–13. (In Russian)

10. Ryabova N. M., CHesheva I. N., Lifashina G. V. Issledovanie velichiny izmeneniya ug-la i cifrovogo nivelira v zavisimosti ot izmeneniya temperatury [Investigation of the magnitude of the change in the angle i of a digital level depending on temperature change]. *Vestnik SGGA* [Bulletin of the SSGA]. 2013, Iss. 4(24), pp. 19–24. (In Russian)

11. Ustavich G. A. et al. Issledovanie shtrih-kodovyh reek cifrovyh nivelirov [Research of barcode rails of digital levels]. *Vestnik SGGA* [Vestnik SSGA]. 2010, Iss. 2 (13), pp. 3–8. (In Russian)

12. Nikonov A. V., Chesheva I. N., Lifashina G. V. Vliyanie perepadov temperatury okru-zhayushchej sredy na glavnoe uslovie cifrovogo nivelira pri nablyudeniyah za osadkami fun-damentov zdanij i sooruzhenij [Influence of ambient temperature drops on the main condition of the digital level when observing the settlements of the foundations of buildings and structures]. *Vestnik SGGA* [Bulletin of the SSGA]. 2016, Iss. 2 (34), pp. 24–33. (In Russian)

13. Gučević J., Delčev S., Ogrizović V. Determining temperature dependence of collimation error of digital level Leica DNA 03. TS08E Engineering Surveying — Equipment. FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures. Marrakech, Morocco, 18–22 May 2011.

14. Ustavich G. A., Soboleva E. L., Ryabova N. M. et al. Issledovanie vliyaniya refrakcii na rezul’taty nivelirovaniya cifrovymi nivelirami [Study of the influence of refraction on the results of leveling with digital levels]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography]. 2011, Iss. 5. pp. 3–9. (In Russian)

15. Novoselov D. B., Novoselov B. A. *Issledovanie raboty vysokotochnogo cifrovogo nivelira v usloviyah nedostatochnoj osveshchennosti. Interekspo GEO-Sibir’ — 2013. IH Me-zhdunar. nauch. kongr.: Mezhdunar. nauch. konf. “Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya”: sb. materialov v 3 t. (Novosibirsk, 15–26 aprelya 2013 g.)* [Study of the operation of a high-precision digital level in low light conditions. Interexpo GEO-Siberia — 2013. IX Intern. scientific Congr.: Intern. scientific conf. “Geodesy, geoinformatics, cartography, mine surveying”: Sat. materials in 3 volumes (Novosibirsk, April 15–26, 2013)]. Novosibirsk: SGGA Publ., 2013, vol. 1, pp. 117–121. (In Russian)

16. Kalinchenko I. S., Uvarov A. I. Issledovanie vliyaniya prirodno-klimaticheskih faktorov na tochnost’ geodezicheskih izmerenij prevyshenij cifrovym nivelirom Trimble DiNi12 [Study of the influence of natural and climatic factors on the accuracy of geodetic measurements of elevations with a Trimble DiNi12 digital level]. *Vestnik OmGAU* [Vestnik OmGAU]. 2012, Iss. 4 (8), pp. 49–53. (In Russian)

17. *Mezhgosudarstvennyj standart GOST 24846—2012. Grunty. Metody izmerenij de-formacij osnovanij zdanij i sooruzhenij* [Interstate standard GOST 24846—2012. Soils. Methods for measuring deformations of the foundations of buildings and structures]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 19 p. (In Russian)

18. *GKINP (GNTA)-03-010-03. Instrukciya po nivelirovaniyu I, II, III, IV klassov* [GKINP (GNTA)-03-010-03. Instructions for leveling I, II, III, IV classes]. Moscow: Kartgeocentr — Geodezizdat Publ., 2004, 244 p. (In Russian)

Received: March 10, 2023
Accepted: April 04, 2023

**Author’s information:**
Nikolay V. KANASHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; nikolay_kanashin@mail.ru
Dmitry A. AFONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; afonin83@yandex.ru