

## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ, том 21, выпуск 1, 2024

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

### Учредитель

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

### Издатель

Общество с ограниченной ответственностью  
«Медиа-Сервис» по договору № ЭА00271  
от 19.12.2023

### Адрес учредителя

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

### Адрес издателя

111116, Москва, ул. Энергетическая, 16, корп. 2,  
пом. 67, комн. 1

### 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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 25.03.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 38.

Тираж 200 экз. Заказ 1293. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024

## SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,  
volume 21, issue 1, 2024

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

### Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport  
University

### Publisher

Media Service LLC under contract № ЭА00271, 19.12.2023

### Founder's address

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

### Publisher's address

111116, Moscow, Energeticheskaya str., 16/2, building 67,  
room 1

### Mass media registration certificate number

ПН N ФС2-7499 dd. 06.04.2005

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

### The journal is registered

in the Russian Science Citation Index (RSCI)

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

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

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

### The journal is distributed

Index Direct Mail Agency «Kniga-Service»: 33315

## JOURNAL STAFF

**Oleg Valinskiy**, Editor-in-chief, PhD Eng. Sci.,  
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 Ledyayev**, 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, 2024.

## СОДЕРЖАНИЕ

### → ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

- П. А. Кравченко, О. А. Куликова, Е. А. Волгарева, А. А. Костылев, М. И. Лещенко**  
Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства .....7
- В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, Ю. Г. Янко**  
О зависимости процесса промерзания грунтов от влажности..... 22
- А. И. Честнов**  
Разработка и применение программы для автоматического нахождения невязки при пространственном контроле режимной метеорологической информации..... 32
- Л. А. Щенявская, Г. Г. Шевченко, П. П. Коваленко**  
Разработка методики определения параметров преобразования систем координат на основе метода нелинейного программирования первого порядка при сопровождении строительства зданий и сооружений.....47
- Л. Р. Маилян, С. А. Стельмах, Е. М. Щербань, А. Д. Петрушин, А. Л. Маилян, Д. М. Ельшаева, Н. А. Щербань, Ю. В. Жеребцов**  
Исследование стойкости бетонов анизотропной и вариатропной структур к попеременному увлажнению и высушиванию .....61
- Ю. Н. Канонин**  
Проблемы безопасности при эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств .....76
- Т. А. Белаш, А. В. Кузнецов, Д. Г. Володченко**  
Анализ напряженно-деформированного состояния узловых соединений высотных зданий при учете климатических воздействий ..... 85
- В. Ф. Лапшин**  
Расчет времени охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией в условиях отрицательных температур ..... 103
- Д. Ван, Л. Д. Терехов**  
Анализ аварийности канализационных трубопроводов внутриконтинентального города северного Китая..... 113

### → ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- Р. Х. Рафиков, А. С. Шинкарук, Н. А. Горюнов**  
Порядок постановки на производство тягового и нетягового подвижного состава и их элементной базы, эксплуатирующихся на инфраструктуре ОАО «РЖД», предприятиями машиностроительного и ремонтного комплекса с целью установления им нового назначенного срока службы ..... 125
- Н. А. Лабутин, Л. К. Дьяченко, Е. Е. Луковников**  
Актуализация методики учета аэродинамического воздействия от поездов на высокоскоростных железнодорожных магистралях ..... 142
- Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, К. Е. Пронин**  
Сравнение длины тормозных путей грузового поезда с однотрубным и двухтрубным питанием тормозной системы ..... 156

<b>В. И. Ульяницкая</b> Модель организации сервисных услуг на железнодорожных вокзалах .....	169
<b>К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин</b> Совершенствование транспортных технологических процессов железнодорожной сети.....	178
<b>С. А. Маринин</b> Методика определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов в границах железной дороги.....	187
<b>В. А. Ламехов, Е. К. Коровяковский</b> Построение краткосрочного прогноза количества вагонов на станции и путях необщего пользования.....	199
<b>Е. Е. Луковников, Л. К. Дьяченко, И. М. Смирнов</b> Экспериментальные исследования динамической работы железнодорожных мостов при воздействии высокоскоростного подвижного состава .....	217
<b>И. Г. Киселев, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский</b> Оптимизации перевозок термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах с применением альтернативных источников энергии .....	229
<b>У. З. Шермухамедов, А. А. Белый, М. М. Собирова, Ш. Ш. Кадилова</b> К оценке технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов .....	238
<b>П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова</b> Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения.....	252
<b>А. В. Романов, А. А. Киселев, А. А. Мирошник, М. В. Бушуев, Н. В. Канахин, Д. А. Афонин, И. А. Карпов</b> Оценка интенсивности накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна на участках обращения тяжеловесных и длинносоставных поездов.....	265
<b>Д. В. Даниленко, В. П. Ефимов, В. А. Чернов, С. О. Комиченко, Т. М. Чернова</b> Исследование ударной вязкости стали литых несущих деталей грузовых вагонов.....	274



## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

<b>А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина</b> Функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной и распределенной системы технологического назначения .....	282
<b>А. Р. Андреева, Р. П. Сорокин, М. А. Сахарова, И. В. Захаров</b> Модель информационно-телекоммуникационного взаимодействия между автоматизированными транспортными средствами в условиях неполного покрытия мобильными сетями.....	290

## CONTENTS

→	<b>GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH</b>	
<hr/>		
<b>P. A. Kravchenko, O. A. Kulikova, E. A. Volgareva, A. A. Kostylev, M. I. Leshchenko</b>	Prospects for research of phosphogypsum as a material for construction .....	7
<b>V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev, Yu. G. Yanko</b>	On the dependence of soil freezing on humidity .....	22
<b>A. I. Chestnov</b>	Development and application of a program for automatic finding of a discrepancy in the spatial control of regime meteorological information .....	32
<b>L. A. Shchenyavskaya, G. G. Shevchenko, P. P. Kovalenko</b>	Development of a methodology for determining the parameters of the transformation of coordinate systems based on the first-order nonlinear programming method when accompanying the construction of buildings and structures .....	47
<b>L. R. Mailyan, S. A. Stel'makh, E. M. Shcherban', A. D. Petrushin, A. L. Mailyan, D. M. El'shaeva, N. A. Shcherban', Yu. V. Zherebtsov</b>	Study of the resistance of concrete of anisotropic and varitropic structures to alternating wetting and drying .....	61
<b>Yu. N. Kanonin</b>	Safety issues when operating highly automated vehicles .....	76
<b>T. A. Belash, A. V. Kuznetsov, D. G. Volodchenko</b>	Analysis of the stress-strain state of nodal joints of high-rise buildings taking into account climatic influences .....	85
<b>V. F. Lapshin</b>	Calculation of cooling time of above-ground water pipeline with heat insulation under conditions of negative temperatures .....	103
<b>D. Wang, L. D. Terekhov</b>	Analysis of the accident rate of drainage pipelines in an inland city in northern China .....	113
→	<b>PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM</b>	
<hr/>		
<b>R. Kh. Rafikov, A. S. Shinkaruk, N. A. Goryunov</b>	The procedure for putting into production traction and non-traction rolling stock and their elemental base, operated on the infrastructure of JSC Russian Railways, by enterprises of the machine-building and repair complex in order to establish a new assigned service life for them .....	125
<b>N. A. Labutin, L. K. Diachenko, E. E. Lukovnikov</b>	Updating the methodology for considering the aerodynamic impact from trains on high-speed railways .....	142
<b>D. V. Osipov, P. Yu. Ivanov, A. A. Khamnaeva, K. E. Pronin</b>	Comparison of the length of the braking tracks of a freight train with single-pipe and double-tube power supply of the braking system .....	156

<b>V. I. Ulyanitskaya</b> The model of the organization of services at railway stations .....	169
<b>K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin</b> Improving transport technological processes of the railway network.....	178
<b>S. A. Marinin</b> Methodology for determining local speed losses of freight trains within the boundaries of the railway .....	187
<b>V. A. Lamekhov, E. K. Korovyakovsky</b> Construction of short-term forecast of the number of railcars at the stations and non-public routes. Results and analysis .....	199
<b>E. E. Lukovnikov, L. K. Diachenko, I. M. Smirnov</b> Experimental research of the dynamic work of railway bridges under the influence of high-speed rolling stock .....	217
<b>I. G. Kiselev, S. B. Komissarov, D. Ya. Monastyrsky</b> Alternative energy sources for transporting thermosensitive goods in autonomous refrigerated containers.....	229
<b>U. Z. Shermukhamedov, A. A. Belyi, M. M. Sobirova, Sh. Sh. Kadirova</b> To assess the technical and operational condition of urban reinforced concrete bridges and overpasses.....	238
<b>P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoiloa</b> Development of a method for spaced control of transistor traction converters of an electric locomotive in the first rectified voltage regulation zone .....	252
<b>A. V. Romanov, A. A. Kiselyov, A. A. Miroshnik, M. V. Bushuev, N. V. Kanashin, D. A. Afonin, I. A. Karpov</b> Assessment of the intensity of accumulation of residual deformations of the main platform of the roadbed in the areas of circulation of heavy and long-component trains.....	265
<b>D. V. Danilenko, V. P. Efimov, V. A. Chernov, S. O. Komichenko, T. M. Chernova</b> Investigation of impact toughness of cast steel for load-bearing parts of freight cars .....	274



## HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

<b>A. K. Kanaev, E. V. Oparin, E. V. Oparina</b> The functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale for a large and distributed technological purpose system .....	282
<b>A. R. Andreeva, R. P. Sorokin, M. A. Saharova, I. V. Zaharov</b> The model of information and telecommunication interaction between automated vehicles in conditions of incomplete coverage by mobile networks.....	290



УДК 625.76

## Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства

П. А. Кравченко<sup>1</sup>, О. А. Куликова<sup>2</sup>, Е. А. Волгарева<sup>1</sup>, А. А. Костылев<sup>1</sup>,  
М. И. Лещенко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ООО «СК Энерготехстрой», Россия, 194044, Санкт-Петербург, ул. Комиссара Смирнова, 15

**Для цитирования:** Кравченко П. А., Куликова О. А., Волгарева Е. А., Костылев А. А., Лещенко М. И. Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 7–21. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21

### Аннотация

**Цель:** аналитическое исследование потенциальной возможности применения полугидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и дигидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) сульфата кальция — фосфогипса — материала, являющегося отходом при производстве минеральных удобрений, в качестве строительного материала для строительства автомобильных дорог, грунтовых сооружений, материала для восстановления автомобильных дорог на участках ремонта инженерных сетей, а также разгрузки выработанных полигонов хранения отходов переработки фосфорных руд химических предприятий, работающих на территории Российской Федерации. **Методы:** анализ сложившейся ситуации на полигонах промышленных предприятий, анализ изученности вопроса утилизации и переработки фосфогипса, а также аналитическая (расчетная) оценка возможности замены распространенных в строительстве сыпучих материалов (песок, щебень) фосфогипсом. **Результаты:** в настоящей статье рассмотрены вопросы, связанные с оценкой возможности использования фосфогипса при снижении его локальной концентрации в зонах его применения, а также уже с использованием отходов, хранящихся на полигонах в течение многих лет. Рассмотренные варианты перспективного применения материала, позволяющие не только сохранить, но и повысить эксплуатационные характеристики автомобильных дорог и иных грунтовых сооружений, исключив при этом потенциально вредное воздействие материала в период эксплуатации, связанного с его пылением в процессе хранения. **Практическая значимость:** анализ сложившейся ситуации свидетельствует о том, что в связи с активно ведущимся в Российской Федерации производством на территории промышленных предприятий, занимающихся переработкой фосфорных руд, и полигонах, закрепленных за этими предприятиями, скапливается огромное количество отхода такого производства — фосфогипса. Объемы ежегодной утилизации фосфогипса на таких предприятиях исчисляются сотнями тысяч и миллионами тонн — формируются огромные отвалы, представляющие опасность как с точки зрения загрязнения грунтовых вод, так и с точки зрения техногенной безопасности. При столь больших объемах сконцентрированного хранения объемы попадающих в почву и грунтовые воды веществ может многократно превышать допустимые значения, но при этом при меньшей концентрации попадание данных веществ в грунт может не только не вредить экологии, но и нести положительный эффект с точки зрения повышения урожайности. Применение отходов таких производств в дорожном строительстве позволит решить проблемы, связанные с утилизацией фосфогипса.

**Ключевые слова:** переработка отходов, вторичное сырье, строительные материалы, фосфогипс, основания дорог, вечная мерзлота.

## Введение

Настоящая работа выполнена в рамках стратегического проекта № 2 «Новые технологии в строительстве» Приоритета 2030, реализуемого ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I». Вопросы эффективной переработки и повторного использования отходов промышленности, извлечения из них ценных примесей (к примеру, драгоценных или редкоземельных металлов) достаточно часто и активно изучаются отечественными и западными учеными [15]. На территории Российской Федерации активно ведется производство минеральных удобрений из фосфорных руд и продуктов их переработки, а также фосфорной и серной кислоты. В качестве сырья при производстве используют фосфориты и апатит  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH})$ .

Побочным продуктом такого производства является фосфогипс. Как отход производства фосфогипс хранится на специально отведенных полигонах, в отвалах. Одним из источников фосфогипса является завод по

производству минеральных удобрений, расположенный в г. Воскресенске Московской области. Для хранения фосфогипса завод использует два полигона (рис. 1).

По состоянию на 2022 год данное инженерно-техническое сооружение занимает площадь более 60 га (по данным анализа карт свободных ресурсов «Яндекс», Google и пр.), притом что площадь самого отвала занимает более 48 га. При углах откосов более  $20^\circ$  высота полигона на отдельных участках превышает 100 м. Хранение отходов при такой высоте отвала является само по себе опасным в связи с высокой вероятностью развития оползневых процессов, обрушения откосов и пр. Объем полигона составил в июне 2022 года 24,26 млн  $\text{м}^3$ , при этом на сентябрь 2021 года объем составлял 23,75 млн  $\text{м}^3$ . Из этого следует, что объем фосфогипса, произведенного за год, составляет более 0,5 млн  $\text{м}^3$ , или более 0,840 млн т (данное значение сильно зависит от плотности отходов после отсыпки в отвал).



**Рис. 1.** Один из двух полигонов хранения фосфогипса, г. Воскресенск (источник фото: Shutterstock/FOTODOM)



Аналогичная проблема существует в Балаковском районе Саратовской области (рис. 2).



**Рис. 2.** Полигон хранения фосфогипса в Балаковском районе Саратовской области (источник фото: <https://nversia.ru/news/fosagro-sobiraetsya-rasshirit-ploschad-otvala-fosfogipsa-balakovskom-rayone/>)

По состоянию на начало 2014 года объем хранящегося на полигоне фосфогипса составлял порядка 53 млн т, что на тот момент составляло порядка 70 % объема промышленных отходов всей Саратовской области (данные сайта <https://nversia.ru/news/zhitel-balakovskogo-rayona-o-rasshireнии-fosfogipsovo-go-otvala-za-cto-vy-nas-travite/>).

Фосфогипс нетоксичен, при сушке и перемешивании пылит. В качестве негативного эффекта такого способа хранения фосфогипса отмечают загрязнение грунтовых вод. При этом стоит отметить, что имеются исследования [8], свидетельствующие о пользе применения нейтрализованного фосфогипса в сельском хозяйстве, к примеру для устранения засоленности почв без дополнительной обработки. Также в одном из исследований [1] приведены сведения не только об эффективности применения, но и о периодичности применения таких удобрений.

В отвалах складировается колоссальный объем материала, что не может не иметь негативных для экологии последствий. При этом при определенной обработке однократное локальное применение небольшого количества материала не оказывает негативного воздействия на окружающую среду и, как говорилось выше, может нести даже некоторый положительный эффект.

### Краткое описание материала

Фосфогипс — это гидрат сульфата кальция, образующийся как побочный продукт при производстве удобрений из фосфоритной породы.

### Общее описание материала

Фосфогипс в больших объемах получают в качестве отхода при производстве фосфорной кислоты. Комплекс технологических операций при таком производстве приводит к образованию двух основных видов отходов — полугидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и дигидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) сульфата кальция.

Имеется ряд научных и исследовательских работ [5, 10], в которых содержатся сведения о физических и механических характеристиках фосфогипсов в различном состоянии. В работах установлено, что на выходе с линии они характеризуются высокой пористостью.

По гранулометрическому составу как полугидрат, так и дигидрат сульфата кальция на выходе с производственной линии представлены частицами размером  $0,05 < d \leq 0,01$  мм. При таком гранулометрическом составе материал можно охарактеризовать как супесь пылеватую.

На выходе с производства плотность скелета фосфогипса составляет  $0,83\text{--}1,27$  т/м<sup>3</sup>, при этом коэффициент пористости состав-

ляет 1,3–1,9. Плотность минеральной части дигидрата составляет примерно 2,37 т/м<sup>3</sup>. В случае полугидрата плотность минеральных частиц несколько выше (2,52 т/м<sup>3</sup>). У фосфогипса на выходе с линии коэффициент фильтрации равен 1–3 м/сут. В результате длительного хранения (у слежавшегося фосфогипса) скорость фильтрации существенно снижается (0,1 м/сут).

Начальная влажность полугидрата составляет 25–30 %. Начальная влажность дигидрата на выходе с линии составляет 35–40 %. Это связано с содержанием в дигидрате 19–20 % кристаллизационной воды, а в полугидрате — около 6 %.

#### *Механические характеристики материала*

В ранее опубликованных научных работах [5, 10] установлено, что прочностные свойства фосфогипсов в виде дигидратов и полугидратов на выходе с технологической линии различаются незначительно:  $\varphi=11\text{--}15^\circ$ ,  $c=0,01\text{--}0,02$  МПа. После отсыпки в отвал прочность дигидрата при условии сохранения начальной влажности мало изменяется (увеличивается до  $\varphi=17^\circ$ ,  $c=0,035$  МПа за 30 суток). С полугидратом процесс протекает несколько иным образом — он активно поглощает влагу и переходит в дигидратное состояние, при этом формируются цементационные структурные связи. За 30 суток прочностные характеристики увеличиваются до  $\varphi=32^\circ$ ,  $c=0,035$  МПа.

Значения деформационных параметров, приведенные в [5, 10], составляли:

- коэффициент сжимаемости  $\alpha=0,058\text{--}0,075$  МПа<sup>-1</sup>;
- модуль деформации  $E_0=25,6\text{--}32,5$  МПа при давлении уплотнения  $P$  от 0,3 МПа до 1,0 МПа.

Авторами отмечено отсутствие различий в деформационном поведении и количественных характеристиках сжимаемости для фосфогипса в полугидратном и дигидратном состоянии.

В другой научной работе [4], освещающей перспективы применения фосфогипса в дорожном строительстве, приведены следующие прочностные и деформационные характеристики в возрасте материала 30 суток для дигидратного состояния:

- предел прочности при изгибе — от 1,5 до 5,0 МПа;
- прочность на сжатие — от 3,5 до 20,0 МПа;
- средняя плотность — от 1,6 до 2,0 т/м<sup>3</sup>;
- водопоглощение — от 1 до 6 %;
- морозостойкость — от 25 до 150 циклов.

#### **Некоторые сведения об опыте применения и экспериментальных исследованиях фосфогипса для решения определенных инженерных задач**

Фосфогипс дорожный применяется для устройства слоев основания, покрытий дорожных одежд автомобильных дорог и для укрепления грунтов, применяемых для устройства несущих и дополнительных слоев оснований и покрытий дорожных одежд, рабочего слоя земляного полотна, а также используется в качестве минерального порошка при приготовлении органоминеральных смесей для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог.

Фосфогипс дорожный состоит из полугидрата сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), небольшого количества дигидрата сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), примесей неразложившегося фосфатного сырья, песка, солей кремнефтористоводородной и фосфорной

кислот, а также воды в связанном (кристаллизационной) и свободном состоянии (сверхкристаллизационной). Фосфогипс дорожный может быть классифицирован как гипс технический марки «В».

Для фосфогипса проводились исследования в части возможности его применения для устройства слоев оснований и покрытий автомобильных дорог. В частности, в одной из научных работ [4] предложено использование фосфогипса в качестве компонента дорожного асфальтобетона — минерального порошка без перевода его в вяжущее вещество. Авторами проведено исследование по замене в составе асфальтобетонной смеси минерального порошка (8 % по массе) фосфогипсом (от 3 до 4 % по массе) с использованием в качестве активатора гудрона (от 0,5 до 2,5 % по массе). При этом в составах корректировалось содержание битума (3,5–4 %) и гравия (46–47 %). В процессе исследования в части фосфогипса авторами установлено, что при водонасыщении образцов происходит кристаллизация фосфогипс-полугидрата в кристалл фосфогипс-дигидрат, которая полностью завершается при длительном водонасыщении, увеличивая прочность образцов.

Авторами одной из научных работ [3] был предложен схожий метод применения фосфогипса. Они предлагают использовать данный материал в производстве асфальтобетонных смесей с получением гранулированного продукта. При этом предложенный авторами подход позволяет получить гранулят, выдерживающий длительное хранение с сохранением эксплуатационных показателей, что решает одну из основных проблем материала — транспортировку и хранение в течение длительного времени до укладки.

Помимо исследований возможности применения фосфогипса в составе дорожных одежд, есть ряд работ, анализирующих возможность замены основания дорожных одежд (щебня, песка) фосфогипсом [6, 7]. Авторы рассматривали укладку в качестве основания под асфальтовое покрытие фосфогипса в полугидратном состоянии. Отмечено, что после уплотнения материал образует прочный монолитный слой. При этом исследование показали, что слои из фосфогипса имеют более высокие прочностные свойства, чем слои щебня и песка, слой из фосфогипса работает как монолитная плита, распределяющая нагрузку на большую поверхность грунтового основания. В работах авторов представлены результаты натурных исследований построенных и эксплуатирующихся дорог.

Имеется ряд публикаций в СМИ, утверждающих, что стоимость строительства дороги с применением фосфогипса обходится дешевле на 30 %, чем дороги с использованием традиционных технологий, а низкая плотность материала и, как следствие, низкая теплопроводность позволяют применять этот материал в качестве монолитного теплоизоляционного слоя на слабых грунтах, снизив риски промерзания и пучения таких грунтов.

Как отмечалось авторами научных работ, в том числе [4] из-за загрязнения фосфогипса различными примесями, требующими нейтрализации, утилизируется лишь малая его часть (менее 10 %). Процесс нейтрализации существенно увеличивает себестоимость фосфогипсового вяжущего материала по сравнению с природным гипсом. Авторы приводят множество вариантов применения фосфогипса, в том числе в дорожном строительстве. При этом темпы накопления отходов на

порядок превышают объемы его применения и переработки, несмотря на широкую сферу использования фосфогипса.

### **Анализ перспектив применения материала в строительной сфере**

Анализ показал вполне определенные, но не исчерпывающие перспективы применения фосфогипса, а темпы утилизации говорят о необходимости поиска направлений применения данного материала.

Несомненно, одним из основных направлений применения фосфогипса является дорожное строительство. Исследования свидетельствуют, что материал позволяет повысить долговечность и прочность конструкций автомобильных дорог. Для исследований материала на кафедре «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I выделены основные направления применения материала в дорожном строительстве:

- устройство отдельных фосфогипсовых слоев многослойных дорожных оснований в сочетании с песчаными и щебеночными подготовками;
- устройство основания под балластную призму по верху земляного полотна железных дорог.

В качестве еще одного потенциального направления применения фосфогипса в составах различных бетонов:

- применение фосфогипса в составе дорожных бетонов;
- применение фосфогипса в составе строительных бетонов для бетонных подготовок, стяжек и пр.;
- применение фосфогипса для ремонтных растворов, растворов для торкретирования и пр.

Многими учеными сегодня отмечаются проблемы, связанные со строительством в условиях вечной мерзлоты, с определением характеристик и параметров грунтов и материалов в условиях промерзания и оттаивания [11, 14]. Нередко возникает необходимость защиты инженерных сетей от воздействия морозного пучения [12] или, наоборот, снижения их воздействия на многолетне- и вечномерзлые грунты. Достаточно сложными инженерными задачами являются задачи термостабилизации грунтов основания для больших площадей возводимых сооружений [2, 9]. Задачи сохранения вечной мерзлоты при строительстве различных сооружений усугубляются в свете глобального потепления [17]. В связи с тем, что во многих статьях обращается внимание на низкую плотность и высокие теплоизоляционные характеристики фосфогипса, также выделено перспективное направление исследований, связанное с применением фосфогипса в качестве изоляционного материала:

- устройство автомобильных дорог в условиях вечной и многолетней мерзлоты с целью снижения влияния на криогенную обстановку;
- укладка инженерных сетей в слой фосфогипса в условиях вечной и многолетней мерзлоты с целью снижения влияния на криогенную обстановку, а также для защиты инженерных сетей и снижения затрат (в том числе по земляным работам) при подземной прокладке в регионах с большой глубиной сезонного промерзания грунтов;
- укладка сетей горячего водоснабжения и теплоснабжения в слое фосфогипса для снижения теплопотерь.

Достаточно частой задачей является оценка работы откосов, анкерных и гибких

подпорных стенок [13], а также задачи, связанные с улучшениями параметров их работы. Для геосинтетических и композиционных материалов (геосетки, георешетки, стеклопластиковые и углепластиковые сетки и пр.), используемых для армирования грунтового основания, анкеровки подпорных стен и т.д., при расчете применяются пониженные коэффициенты трения (коэффициент трения материал/грунт принимается ниже, чем коэффициент трения грунт/грунт, как правило, на 20%). При этом проблемы укрепления и сохранения откосов, в частности, возникают в совокупности с проблемами строительства на мерзлых и оттаивающих грунтах [16]. Применение фосфогипса как отдельного материала, так и в составе специальных строительных смесей, вероятно, сможет обеспечить более высокое трение на поверхности контакта грунта и материала. Для изучения данного вопроса в качестве перспективных направлений для исследования выделены следующие области возможного применения:

- армирование насыпей и откосов геосинтетическими и композиционными материалами в слоях фосфогипса;
- повышение характеристик анкеровки геосинтетических и композиционных материалов в теле грунтовых сооружений по средствам применения фосфогипса;
- применение композиционных армированных сеток для повышения прочности оснований из фосфогипса.

### Оценка возможности применения фосфогипса в составе конструкции автомобильных дорог

На одном из объектов в составе сети автомобильных дорог была запроектирована автомобильная дорога 2-й и 4-й категории.

В настоящем разделе дана сопоставительная расчетная оценка конструкции этих автомобильных дорог с учетом замены слоя песчаного основания фосфогипсом.

#### Расчет конструкций дорожной одежды по упругому прогибу

Расчет конструкции дорожной одежды выполнен в соответствии с методикой, предложенной ОДН 218.046–01. Для фосфогипса, укладываемого взамен слоя песка, в качестве модуля упругости в расчетах будем принимать величину, которую в соответствии с п. 5.5.31 СП 50–101–2004 рекомендовали использовать для оценки осадки — модуль деформации по ветви вторичного нагружения, который, в свою очередь, в соответствии с Примечаниями к п. 5.5.31, может быть вычислен как  $5 \cdot E_0$ . При модуле деформации  $E_0 = 25,6$  МПа модуль упругости в первом приближении может быть определен как  $E = 5 \cdot 25,6 = 128$  МПа.

Основание автомобильных дорог представлено суглинком легким, пылеватым, с относительной влажностью 0,75. Модуль упругости такого основания составляет  $E_r = 38$  МПа.

Вычислим поверхностный модуль упругости для дороги 2-й категории при использовании в качестве грунтов основания песка крупного:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{130} = 0,292; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{\text{пов}5}}{E_5} = 0,664 \Rightarrow E_{\text{пов}5} = 0,664 \cdot 130 = 86,3 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}5}}{E_4} = \frac{86,3}{260} = 0,332; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{\text{пов}4}}{E_4} = 0,607 \Rightarrow E_{\text{пов}4} = 0,607 \cdot 260 = 157,8 \text{ МПа};$$

ТАБЛИЦА 1. Слои дорожной одежды

Слой	Дорога 2-й категории	Дорога 4-й категории
Слой № 1	Щебеночно-мастичный асфальтобетон, марка битума БНД 70/100 с максимальным размером зерна 16 мм $h = 70$ мм	Асфальтобетон горячей укладки пористый I марки из крупнозернистой щебеночной (гравийной) смеси, марка битума БНД 40/60 $h = 70$ мм
Слой № 2	Асфальтобетон для оснований на битумном вяжущем марки БНД 70/100 с максимальным размером зерна 22 мм $h = 100$ мм	Асфальтобетон горячей укладки пористый II марки из мелкозернистой щебеночной (гравийной) смеси, марка битума БНД 60/90 $h = 80$ мм
Слой № 3	Асфальтобетон для оснований на битумном вяжущем марки БНД 70/100 с максимальным размером зерна 22 мм $h = 100$ мм	—
Слой № 4	Щебеночно-песчаная смесь при максимальном размере зерна до 40 мм $h = 300$ мм	Щебень фр. 40–80 (80–120) трудноуплотняемый с заклинкой мелкой фракцией $h = 300$ мм
Слой № 5	Песок крупный $h = 500$ мм	Песок крупный $h = 500$ мм
Земляное полотно	Суглинок легкий, пылеватый с относительной влажностью 0,75	Суглинок легкий, пылеватый с относительной влажностью 0,75

$$\frac{E_{\text{пов}4}}{E_3} = \frac{157,8}{3250} = 0,0486; \quad \frac{h_3}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_3} = 0,087 \Rightarrow E_{\text{пов}3} = 0,087 \cdot 3250 = 282,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_2} = \frac{282,8}{3250} = 0,087; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_2} = 0,146 \Rightarrow E_{\text{пов}2} = 0,146 \cdot 3250 = 474,5 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_1} = \frac{474,5}{3800} = 0,125; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{\text{пов}1}}{E_1} = 0,151 \Rightarrow E_{\text{пов}1} = 0,151 \cdot 3800 = 573,8 \text{ МПа}.$$

В случае замены слоя песка (слой № 5) в составе рассмотренной конструкции фосфогипсом с модулем упругости  $E = 128$  МПа поверхностный модуль упругости изменится следующим образом:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{128} = 0,297; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{\text{пов}5}}{E_5} = 0,686 \Rightarrow E_{\text{пов}5} = 0,686 \cdot 128 = 87,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}5}}{E_4} = \frac{87,8}{260} = 0,338; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{\text{пов}4}}{E_4} = 0,622 \Rightarrow E_{\text{пов}4} = 0,622 \cdot 260 = 161,7 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}4}}{E_3} = \frac{161,7}{3250} = 0,0498; \quad \frac{h_3}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_3} = 0,095 \Rightarrow E_{\text{пов}3} = 0,095 \cdot 3250 = 308,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}3}}{E_2} = \frac{308,8}{3250} = 0,095; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{100}{345} = 0,29;$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_2} = 0,153 \Rightarrow E_{\text{пов}2} = 0,153 \cdot 3250 = 497,3 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{\text{пов}2}}{E_1} = \frac{497,3}{3800} = 0,131; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{\text{пов}1}}{E_1} = 0,158 \Rightarrow E_{\text{пов}1} = 0,158 \cdot 3800 = 600,4 \text{ МПа}.$$

Вычислим поверхностный модуль упругости для дороги 4-й категории при использовании в качестве грунтов основания песка крупного:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{130} = 0,292; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_5} = 0,664 \Rightarrow E_{пов5} = 0,664 \cdot 130 = 86,3 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_4} = \frac{86,3}{350} = 0,247; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{пов4}}{E_4} = 0,529 \Rightarrow E_{пов4} = 0,529 \cdot 350 = 185,2 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов3}}{E_2} = \frac{185,2}{2000} = 0,093; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{80}{345} = 0,23;$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_2} = 0,137 \Rightarrow E_{пов2} = 0,137 \cdot 2000 = 274,0 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_1} = \frac{274,0}{2800} = 0,098; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{пов1}}{E_1} = 0,131 \Rightarrow E_{пов1} = 0,131 \cdot 2800 = 366,8 \text{ МПа}.$$

В случае замены слоя песка (слой № 5) в составе рассмотренной конструкции фосфогипсом с модулем упругости  $E = 128$  МПа поверхностный модуль упругости изменится следующим образом:

$$\frac{E_r}{E_5} = \frac{38}{128} = 0,297; \quad \frac{h_5}{D} = \frac{500}{345} = 1,45;$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_5} = 0,686 \Rightarrow E_{пов5} = 0,686 \cdot 128 = 87,8 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов5}}{E_4} = \frac{87,8}{350} = 0,251; \quad \frac{h_4}{D} = \frac{300}{345} = 0,87;$$

$$\frac{E_{пов4}}{E_4} = 0,539 \Rightarrow E_{пов4} = 0,539 \cdot 350 = 188,7 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов4}}{E_2} = \frac{188,7}{2000} = 0,094; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{80}{345} = 0,23;$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_2} = 0,139 \Rightarrow E_{пов2} = 0,139 \cdot 2000 = 278,0 \text{ МПа};$$

$$\frac{E_{пов2}}{E_1} = \frac{278,0}{2800} = 0,099; \quad \frac{h_2}{D} = \frac{70}{345} = 0,203;$$

$$\frac{E_{пов1}}{E_1} = 0,132 \Rightarrow E_{пов1} = 0,132 \cdot 2800 = 369,6 \text{ МПа}.$$

В соответствии с данным расчетом замена слоя песка фосфогипсом такой же мощности приводит к незначительному повышению поверхностного модуля упругости дорожной одежды. Следовательно, с точки зрения расчета дорожной одежды по упругому прогибу слой песка в дорожной одежде может быть заменен слоем фосфогипса аналогичной толщины.

*Оценка изменения теплопроводности конструкции дорожной одежды при замене слоя песка слоем фосфогипса*

В соответствии с ОДН 218.046-01 термическое сопротивление дорожной одежды оценивается суммой частных от деления мощностей слоев на соответствующие величины теплопроводности данных слоев:

$$R_{од(о)} = \sum \frac{h_{од(i)}}{\lambda_{од(i)}}.$$

Для основных материалов конструкции коэффициенты теплопроводности материала могут быть определены по Приложениям к ОДН 218.046-01.

Значения коэффициентов и мощностей слоев приведены в табличной форме ниже.

В этом случае термическое сопротивление дорожной одежды дороги 2-й категории:

$$R_{од(о)} = \frac{0,27}{1,40} + \frac{0,30}{2,10} + \frac{0,50}{1,74} = 0,623.$$

Термическое сопротивление дорожной одежды дороги 2-й категории при замене песка фосфогипсом:

ТАБЛИЦА 2. Теплотехнические характеристики материалов дорожной одежды

№ слоя	Наименование материала	Мощность слоя, м	К-т теплопроводности, Вт/м·К
Дорога 2-й категории			
1-3	Асфальтобетон плотный (3 слоя)	0,27	1,40
4	Щебеночно-песчаная смесь	0,30	2,10
5	Песок крупный	0,50	1,74
5*	Фосфогипс	0,50	0,35
Дорога 4-й категории			
1	Асфальтобетон плотный	0,07	1,40
2	Асфальтобетон пористый	0,08	1,25
4	Щебень	0,30	1,86
5	Песок крупный	0,50	1,74
5*	Фосфогипс	0,50	0,35
Примечание:			
* альтернативный слой грунта, применяемый взамен слоя с тем же номером без «*»			

$$R_{\text{од(о)}} = \frac{0,27}{1,40} + \frac{0,30}{2,10} + \frac{0,50}{0,35} = 1,764.$$

Увеличение термического сопротивления для конструкций автомобильной дороги 2-й категории за счет укладки фосфогипса взамен крупного песка составляет  $1,764 / 0,623 = 2,8$  раза.

Термическое сопротивление дорожной одежды дороги 4-й категории:

$$R_{\text{од(о)}} = \frac{0,07}{1,40} + \frac{0,08}{1,25} + \frac{0,30}{1,86} + \frac{0,50}{1,74} = 0,563.$$

Термическое сопротивление дорожной одежды дороги 4-й категории при замене песка фосфогипсом:

$$R_{\text{од(о)}} = \frac{0,07}{1,40} + \frac{0,08}{1,25} + \frac{0,30}{1,86} + \frac{0,50}{0,35} = 1,704.$$

Увеличение термического сопротивления для конструкций автомобильной дороги 4-й категории за счет укладки фосфогипса взамен крупного песка составляет  $1,704 / 0,563 = 3,0$  раза.

### Заключение

Анализ исследований существующих технологий и опыта применения фосфогипса в некоторых сферах строительства указывает на наличие определенных перспектив исследований фосфогипса. Имеется ряд исследований фосфогипса, технологий его применения и переработки, выделения из фосфогипса микропримесей редкоземельных металлов и пр. Однако практически не снижающиеся объемы хранения данного отхода производства свидетельствуют о невозможности, нецелесообразности применения предложенных технологий или о малом объеме переработки фосфогипса, связанном с невысоким спросом на конечный продукт.

Это еще раз указывает на необходимость разработки новых направлений для утилизации и переработки фосфогипса. В связи с этим определенные при анализе направления исследования представляются перспективными.

Аналитические расчеты конструкций автомобильных дорог показали возможность замены слоя песка в составе конструкции слоем фосфогипса такой же мощности. В рассматри-



ваемых случаях это приводит к незначительному повышению поверхностного модуля упругости дорожной одежды. С точки зрения расчета дорожной одежды по упругому прогибу слой песка в дорожной одежде может быть заменен слоем фосфогипса аналогичной толщины. Стоит отметить, что расчет выполнялся для фосфогипса, прошедшего повторное измельчение, без учета набора прочности за счет повторного твердения.

Расчет термодинамического сопротивления дорожных одежд показал, что величина термодинамического сопротивления рассмотренной многослойной конструкции дорожных одежд увеличивается до 3 раз при замене слоя крупного песка фосфогипсом.

### Библиографический список

1. Аканова Н. И., Шеуджен А. Х., Визирская М. М. Агроэкологическая оценка эффективности систематического применения фосфогипса в рисовом севообороте. SPIRIT TIME. Учредители: Берлинский университет им. Гумбольдта, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени Адмирала Макарова, eISSN: 2522–9923. 2019. № 1 (13). С. 42–43.
2. Белова О. И., Парамонов М. В., Сахаров И. И. Термостабилизация оснований сооружений больших плановых размеров в криолитозоне. Материалы научно-практической конференции «Композитные материалы в строительстве объектов транспортной инфраструктуры»; под ред. А. В. Квитко. СПб.: Изд-во: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург), 2018. С. 69–74.
3. Герасимов Д. В., Игнатъев А. А., Готовцев В. М. и др. Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона // Дороги и мосты. 2018. № 40. С. 304–315.
4. Ковалев Я. Н., Яглов В. Н., Чистова Т. А. и др. Применение фосфогипса в дорожном строительстве // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 6. С. 493–498. DOI: 10.21122/2227–1031–2021–20–6–493–498.
5. Коробанова Т. Н. Геодинамическое обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании: дис. ... канд. техн. наук. Научный руководитель: д. т. н. Кутепова Н. А. СПб.: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 2018. 175 с.
6. Коротковский С. А., Талалай В. В., Кочетков А. В. и др. Применение фосфогипса для строительства автомобильной дороги. В сборнике: I Международная научно-техническая конференция «Долговечность и надежность строительных материалов и конструкций в эксплуатационной среде». М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2017. С. 264–273.
7. Кочетков А. В., Янковский Л. В. Применение фосфогипса для строительства монолитных слоев дорожной одежды // Журнал Пермского национального исследовательского политехнического университета. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 4. С. 91–102. DOI: 10.15593/24111678/2017.04.07.
8. Кизинек С. В., Шеуджен А. Х., Аканова Н. И. и др. Экологические и агроэкономические аспекты применения фосфогипса в сельском хозяйстве // Научно-методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс». 2013. Т. 2, № 09 (13). С. 206–217.
9. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. Создание условий нормативного состояния деградирующих многолетнемерзлых оснований зданий и сооружений Дальневосточного федерального округа и Арктики. Сборник научных трудов РААСН. Т. 2. М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2022. С. 157–164. EDN: ZTRV7I.
10. Кутепова Н. А., Коробанова Т. Н. Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса в г. Балаково Саратовской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017.

№ 10. С. 132–140. DOI: 10.25018/0236–1493–2017–10–0–132–140.

11. Парамонов М. В. Напряженно-деформированное состояние системы «Основание — сооружение» при неоднородном промерзании грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Парамонов Максим Владимирович. СПб.: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». 2013.

12. Петров А. М., Сычкина Е. Н. Оценка влияния морозного пучения при расчетах подземного трубопровода // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2020. Т. 2. С. 298–303.

13. Сливец К. В. Экспериментальные и теоретические исследования работы гибкой подпорной стенки // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: строительство и транспорт. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс». 2008. № 4–20. С. 32–38.

14. Сливец К. В., Колмогорова С. С., Коваленко И. А. Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 2. С. 359–366. DOI: 10.20295/1815–588X-2022–19–2–359–366.

15. Сычкина Е. Н., Утробина О. Ю., Машенко А. В. Золото из техногенных отвалов и рос-

сыпей // Металлогения древних и современных океанов. Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН. 2010. № 1. С. 209–212.

16. Kudryavtsev S., Valtceva T., Kotenko Z., et al. Reinforcing a railway embankment on degrading permafrost subgrade soils. *Advances in intelligent systems and computing*. Springer Nature Switzerland AG. 2021. Vol. 1258. P. 35–44. DOI: 10.1007/978–3–030–57450–5\_4.

17. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V., et al. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the arctic zone in conditions of global warming. X international scientific siberian transport forum — TRANSSIBERIA 2022. “Transportation Research Procedi”. Elsevier B. V., 2022. Vol. 63. P. 2506–2514. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.

Дата поступления: 23.11.2023

Решение о публикации: 15.01.2024

#### **Контактная информация:**

КРАВЧЕНКО Павел Александрович — канд. техн. наук; pasha.sky@gmail.com

КУЛИКОВА Оксана Александровна — начальник отдела проектирования; kulikovaoksana@gmail.com

ВОЛГАРЕВА Екатерина Александровна — студент гр. АДБ-111; volgareva.1999@mail.ru

КОСТЫЛЕВ Андрей Александрович — студент гр. АДБ-111; tolstyak2002@yandex.ru

ЛЕЩЕНКО Михаил Игоревич — студент гр. АДБ-111; leshchenko2004m@gmail.com

## Prospects for research of phosphogypsum as a material for construction

**P. A. Kravchenko<sup>1</sup>, O. A. Kulikova<sup>2</sup>, E. A. Volgareva<sup>1</sup>, A. A. Kostylev<sup>1</sup>, M. I. Leshchenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> ООО “SK Energotechstroy”, 15, Komissara Smirnova st., Saint Petersburg, 194044, Russia

**For citation:** *Kravchenko P. A., Kulikova O. A., Volgareva E. A., Kostylev A. A., Leshchenko M. I.* Prospects for research of phosphogypsum as a material for construction // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024, Vol. 21, iss. 1. P. 7–21 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21

### Abstract

**Objective:** analytical investigation of the potential use of hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) and dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) calcium sulfate — phosphogypsum — a waste in the production of mineral fertilizers, as a construction material for the construction of roads, soil structures, material for the restoration of roads in the areas of repair of utility networks, as well as unloading of developed landfills for the storage of waste from processing phosphorus ores of chemical enterprises operating in the Russian Federation. **Methods:** analysis of the current situation at landfills of industrial enterprises, analysis of the knowledge of the issue of utilization and processing of phosphogypsum, as well as analytical (calculation) assessment of the possibility of replacing bulk materials (sand, crushed stone) with phosphogypsum common in construction. **Results:** this article discusses issues related to the assessment of the possibility of using phosphogypsum with a decrease in its local concentration in the zones of its application, as well as with the use of waste stored at landfills for many years. The considered options for prospective use of the material, which make it possible not only to preserve, but also to increase the operational characteristics of roads and other soil structures, while eliminating the potentially harmful effect of the material during operation associated with its dusting during storage. **Practical significance:** analysis of the current situation indicates that due to the active production in the Russian Federation, a huge amount of waste from such production — phosphogypsum — accumulates on the territory of industrial enterprises engaged in the processing of phosphorus ores and landfills assigned to these enterprises. The annual utilization of phosphogypsum at such enterprises is estimated at hundreds of thousands and millions of tons — huge dumps are formed, which pose a danger both from the point of view of groundwater pollution and from the point of view of man-made safety. With such large volumes of concentrated storage, the volumes of substances entering the soil and groundwater may repeatedly exceed the permissible values, but at the same time, with a lower concentration, the ingress of these substances into the soil may not only not harm the environment, but also have a positive effect in terms of increasing yield. The use of waste from such production facilities in road construction will solve the problems associated with the disposal of phosphogypsum.

**Keywords:** waste processing, secondary raw materials, building materials, phosphogypsum, road bases, permafrost.

### References

1. Akanova N. I., Sheudzhen A. H., Vizirskaja M. M. Agrojekologicheskaja ocenka jeffektivnosti sistematičeskogo primenenija fosfogipsa v risovom sevooborote. SPIRIT TIME. Uchrediteli: Berlinskij universitet im. Gumbol'dta, Hersonskij filial Nacional'nogo universi-

teta korablestroenija imeni Admirala Makarova, eISSN: 2522–9923. 2019. № 1(13). S. 42–43. (In Russian)

2. Belova O. I., Paramonov M. V., Saharov I. I. Termostabilizacija osnovanij sooruzhenij bol'shih planovyh razmerov v kriolitozone. Materialy nauchno-praktičeskoj konferencii “Kompozitnye materialy

v stroitel'stve ob#ektov transportnoj infrastruktury"; pod red. A. V. Kvitko. SPb.: Izd-vo: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet (Sankt-Peterburg), 2018. S. 69–74. (In Russian)

3. Gerasimov D. V., Ignat'ev A. A., Gotovcev V. M. i dr. Perspektivy ispol'zovaniya fosfogipsa v proizvodstve asfal'tobetona // *Dorogi i mosty*. 2018. № 40. S. 304–315. (In Russian)

4. Kovalev Ja. N., Jaglov V. N., Chistova T. A. i dr. Primenenie fosfogipsa v dorozhnom stroitel'stve // *Nauka i tehnika*. 2021. T. 20, № 6. S. 493–498. DOI: 10.21122/2227–1031–2021–20–6–493–498. (In Russian)

5. Korobanova T. N. Geodinamicheskoe obosnovanie ustojchivosti otvalov fosfogipsa na glinistom gruntovom osnovanii: dis. ... kand. tehn. nauk. Nauchnyj rukovoditel': d. t. n. Kutepova N. A. SPb.: FGBOU VO "Sankt-Peterburgskij gornyj universitet", 2018. 175 s. (In Russian)

6. Korotkovskij S. A., Talalay V. V., Kochetkov A. V. i dr. Primenenie fosfogipsa dlja stroitel'stva avtomobil'noj dorogi. V sbornike: I Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Dolgovechnost' i nadezhnost' stroitel'nyh materialov i konstrukcij v jekspluacionnoj srede". M.: Nacional'nyj issledovatel'skij jadernyj universitet "MIFI", 2017. S. 264–273. (In Russian)

7. Kochetkov A. V., Jankovskij L. V. Primenenie fosfogipsa dlja stroitel'stva monolitnyh sloev dorozhnoj odezhdy // *Zhurnal Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija*. 2017. № 4. S. 91–102. DOI 10.15593/24111678/2017.04.07. (In Russian)

8. Kizinek S. V., Sheudzhen A. H., Akanova N. I. i dr. Jekologicheskie i agrojekonomicheskie aspekty primeneniya fosfogipsa v sel'skom hozjajstve // *Nauchno-metodicheskij zhurnal "XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego pljus"*. 2013. T. 2, № 09 (13). S. 206–217. (In Russian)

9. Kudrjavcev S. A., Saharov I. I., Paramonov V. N. Sozdanie uslovij normativnogo sostojaniya degradirujushhix mnogoletnemerzlyh osnovanij zdanij i sooruzhenij Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga i Arktiki. *Sbornik nauchnyh trudov RAASN*. T. 2. M.: Rossijskaja akademija arhitektury i stroitel'nyh nauk, 2022. S. 157–164. EDN: ZTPVTI. (In Russian)

10. Kutepova N. A., Korobanova T. N. Osobenosti razvitija deformacij otvalov fosfogipsa v g. Balakovo Saratovskoj oblasti // *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*. 2017. № 10. S. 132–140. DOI: 10.25018/0236–1493–2017–10–0–132–140. (In Russian)

11. Paramonov M. V. Naprjazhenno-deformirovanoe sostojanie sistemy "Osnovanie — sooruzhenie" pri neodnomernom promerznanii gruntov: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.02 / Paramonov Maksim Vladimirovich. SPb.: FGBOU VPO "Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet". 2013. (In Russian)

12. Petrov A. M., Sychkina E. N. Ocenka vlijaniya moroznogo puchenija pri raschetah podzemnogo truboprovoda // *Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teorija i praktika*. Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet. 2020. T. 2. S. 298–303. (In Russian)

13. Slivec K. V. Jeksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya raboty gibkoj podpornoj stenki // *Izvestija Orlovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija: stroitel'stvo i transport. Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Gosudarstvennyj universitet — uchebno-nauchno-proizvodstvennyj kompleks"*. 2008. № 4–20. S. 32–38. (In Russian)

14. Slivec K. V., Kolmogorova S. S., Kovalenko I. A. Parametry merzlyh gruntov pri chislennom modelirovanii teplofizicheskix zadach // *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2022. T. 19. № 2. S. 359–366. DOI: 10.20295/1815–588X-2022–19–2–359–366. (In Russian)

15. Sychkina E. N., Utrobina O. Ju., Mashhenko A. V. Zoloto iz tehnogennyh otvalov i rossypej // Metallogeniya drevnih i sovremennyh okeanov. Juzhno-Ural'skij federal'nyj nauchnyj centr mineralogii i geojekologii UrO RAN. 2010. № 1. S. 209–212. (In Russian)

16. Kudryavtsev S., Valtceva T., Kotenko Z., et al. Reinforcing a railway embankment on degrading permafrost subgrade soils. *Advances in intelligent systems and computing*. Springer Nature Switzerland AG. 2021. Vol. 1258. P. 35–44. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_4.

17. Sakharov I., Kudryavtsev S., Paramonov V., et al. Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the arctic zone in conditions of global warming. X international scientific siberian transport forum — TRANSSIBERIA 2022. “Transportation Re-

search Procedi”. Elsevier B. V., 2022. Vol. 63. P. 2506–2514. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288.

Received: 23.11.2023

Accepted: 15.01.2024

**Author’s information:**

Pavel A. KRAVCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; pasha.sky@gmail.com

Oksana A. KULIKOVA — Head of Design Department; kulikovaoksana@gmail.com

Ekaterina A. VOLGAREVA — Student; volgareva.1999@mail.ru

Andrey A. KOSTYLEV — Student; tolstyak2002@yandex.ru

Mihail I. LESHCHENKO — Student; leshchenko2004m@gmail.com

УДК 551.343.74

## О зависимости процесса промерзания грунтов от влажности

В. И. Штыков<sup>1</sup>, А. Б. Пономарев<sup>1</sup>, Ю. Г. Янко<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт, Россия, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14

**Для цитирования:** Штыков В. И., Пономарев А. Б., Янко Ю. Г. О зависимости процесса промерзания грунтов от влажности // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 22–31. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-22-31

### Аннотация

**Цель:** температуры начала замерзания грунтов при наступлении заморозков интересуют строителей. Ранее было установлено, что на промерзание грунтов влияют многие факторы, однако недостаточно проводилось исследований по влиянию на процесс промерзания отдельных факторов. В статье рассматривается влияние влажности грунтов на температуры их переохлаждения и замерзания.

**Методы:** исследования проводились в микрохолодильнике при трех режимах промораживания.

**Результаты:** было установлено, что при постоянном встряхивании температура переохлаждения повышалась, а температура замерзания не изменялась. Получены графические зависимости температур переохлаждения и замерзания грунтов от исходной влажности. Степень уплотнения грунтов не оказывала влияния на эти температуры. Температуры переохлаждения и замерзания грунтов зависят в большей степени от дисперсности грунтов, чем от содержания в них органических веществ.

**Практическая значимость:** результаты работы имеют значение для строительства, так как расширяют представления об особенностях механизма замерзания грунтов.

**Ключевые слова:** переохлаждение грунта, грунт, замерзание грунта, режимы охлаждения, почвенная вода, температура переохлаждения, влажность.

### Введение

В предзимний и ранневесенний периоды переходы от положительных к отрицательным температурам и наоборот происходят неоднократно. Строителей интересует, при каких величинах отрицательных температур начнется замерзание грунтов. Среди наиболее ранних исследований по температурам переохлаждения и замерзания грунтов следует отметить работы П. И. Андрианова [1] и А. А. Ананяна [2], в которых основное внимание было обращено на причины переохлаждения. В более поздних работах [3, 4] было установлено, что кинетика льдообразования в грунтах зависит от многих факто-

ров: разновидности, структуры поверхности и порового пространства, состава и вязкости порового раствора, вибрации, градиента температур и т. д. Было установлено, что скорость изменения величины отрицательной температуры вблизи внешней поверхности грунта уменьшает продолжительность его переохлаждения и увеличивает максимальную температуру переохлаждения. Влияние скорости понижения температуры на переохлаждение поровой влаги в грунтах рассматривалось также другими авторами [5–8]. Появились работы, посвященные новым методам определения количества

незамерзшей воды [9]. А. А. Коноваловым [10] была исследована взаимосвязь температуры переохлаждения с прочностью грунта в замерзшем состоянии. В связи с обилием факторов, влияющих на процессы промерзания грунтов, существенные затруднения возникают при разработке математического моделирования процессов [11, 12].

### Цель исследования

Из выполненных ранее работ по температурам переохлаждения грунтов следует, что последние зависят от многих факторов и появилась необходимость в проведении исследований по оценке зависимости температур переохлаждения и замерзания грунтов от отдельных факторов. В данной статье рассмотрены результаты исследований по зависимости температур переохлаждения и замерзания грунтов от влажности. Этот вопрос представляет как теоретический, так и практический интерес для проектирования транспортных объектов в северных климатических условиях [13–15].

### Объекты и методы исследования

Температуры переохлаждения и замерзания грунтов исследовались при различных режимах охлаждения и исходной влажности с использованием микрохолодильника. Изменение режимов охлаждения осуществлялось регулятором напряжения, обеспечивающим плавную регулировку напряжения от 50 до 250 В. Температуру внутри образца, а также в пространстве между стенкой пробирки и охлаждаемым стаканом микрохолодильника измеряли с помощью медь-константановых термопар и микроамперметра.

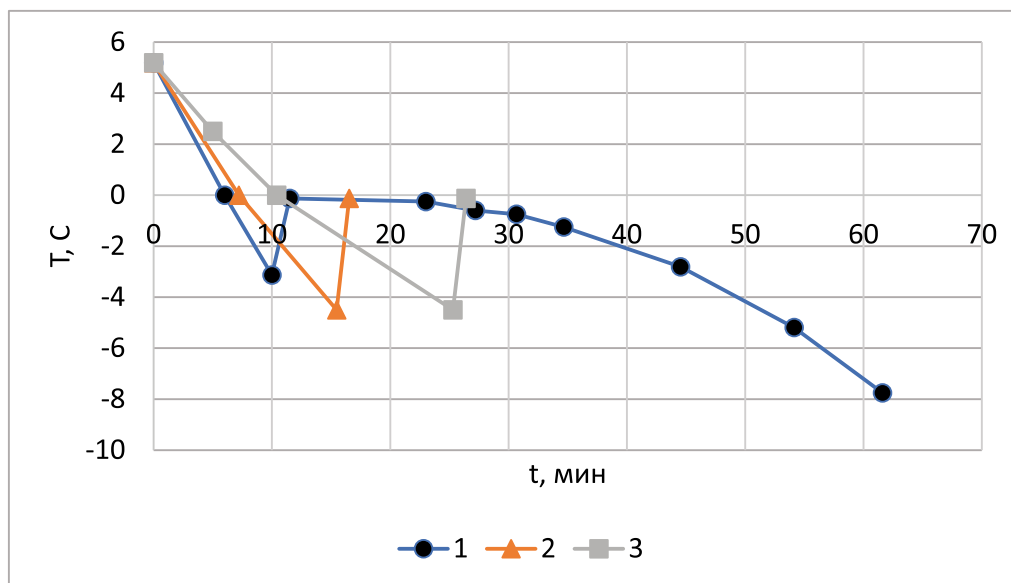
При измерении нулевые спаи термопар располагали в сосуде Дьюара с мелко измельченным льдом объемом 1,5 л, кото-

рый имел дополнительную теплоизоляцию в виде пенопластового корпуса с крышкой. Образцы грунта при различном увлажнении и уплотнении закладывали в стеклянную пробирку диаметром 10 и высотой 60 мм. Образец имел объем около 5 см<sup>3</sup>, чтобы по возможности уменьшить неравномерность охлаждения по объему. Примерно по центру образца прокалывали отверстие для ввода рабочего спая термопары. За 30–40 минут до начала опыта микрохолодильник включали в сеть. Загрузку пробирки с образцом проводили после установления в микрохолодильнике постоянной отрицательной температуры, величина которой определяет режим охлаждения. Каждый из образцов охлаждали при трех режимах при температурах в микрохолодильнике –32, –24 и –170 °С.

### Результаты

Переход при отрицательных температурах почвенной воды в лед, или процесс замерзания, характеризуется температурными кривыми, представленными на рис. 1. При этом начальный участок кривых от 00 до температурного скачка характеризует явление переохлаждения воды в грунтах, предшествующее их замерзанию. Температурный скачок свидетельствует о начале замерзания грунта. Температурой переохлаждения грунта в настоящей статье мы называем наименьшую температуру в нем, которая достигается к моменту наступления температурного скачка. За температуру начала замерзания грунта принимается наивысшая и наиболее устойчивая температура, устанавливающаяся в образце вслед за температурным скачком [1].

На рис. 1 одна из кривых, соответствующая минимальной температуре охлаждения, показана полностью, а остальные только до



**Рис. 1.** Кривые замораживания торфяника. Температуры в микрохолодильнике:  
1:  $-32,40$ ; 2:  $-24,40$ ; 3:  $-17,10$ ; весовая влажность — 178 %; объемный вес —  $0,38 \text{ г/см}^3$

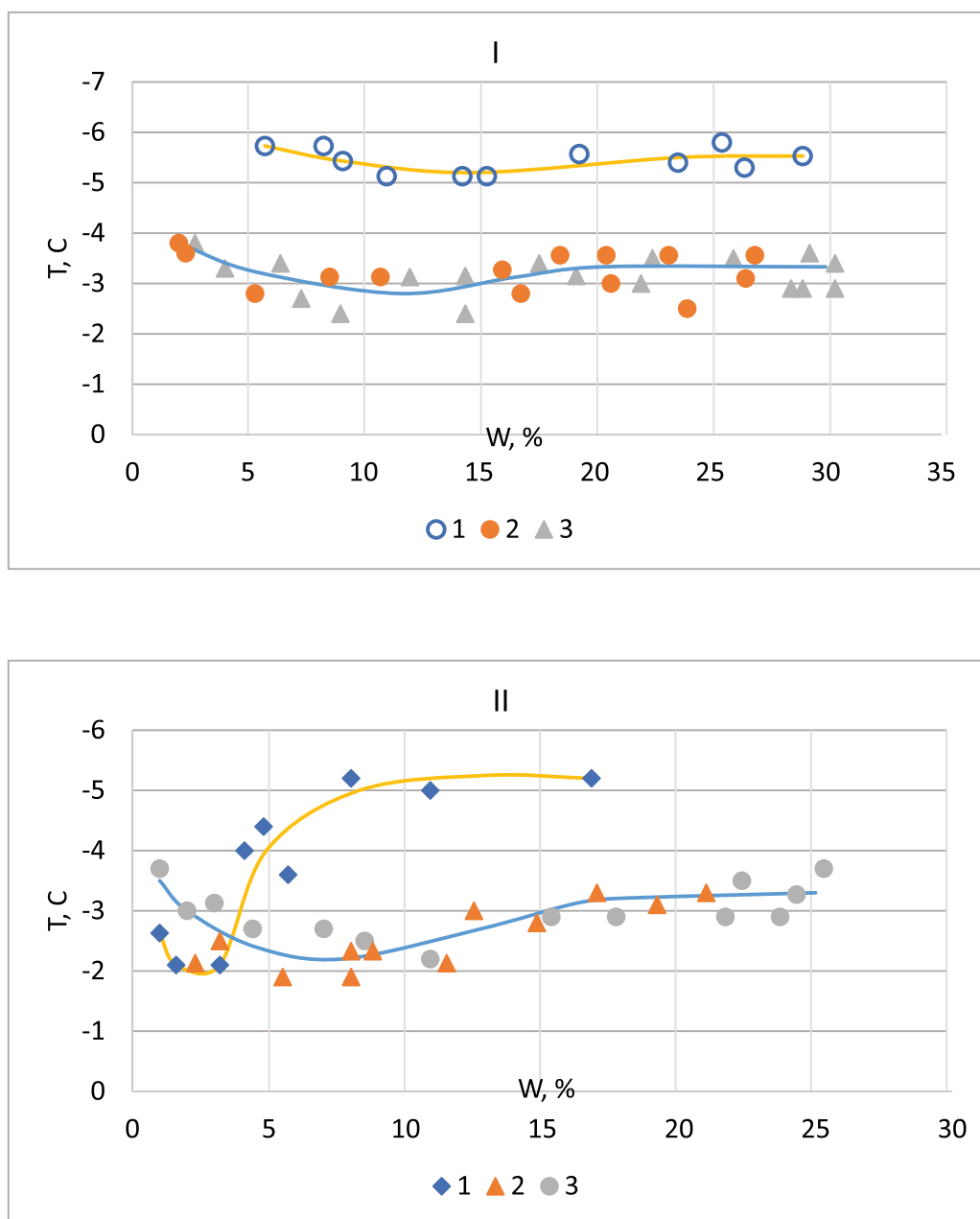
температуры замораживания. При рассмотрении полной кривой замораживания, в частности ее правой части, начиная с точки, отвечающей температуре замораживания, видно, что процесс замораживания характеризуется спектром температур. Объясняется это тем, что, во-первых, сначала замораживает менее связанная влага и, во-вторых, с уменьшением содержания внутрипорового раствора в жидкой фазе увеличивается его концентрация. Причины переохлаждения грунтов исследовали П. И. Андрианов [1] и А. А. Ананян [2].

Большинство опытов с целью сокращения времени, необходимого для их проведения, проводили при довольно низких температурах внутри микрохолодильника. Для определения же времени, в течение которого грунт способен находиться в переохлажденном состоянии, в нескольких опытах в микрохолодильнике создавали температуру на несколько десятых градуса более вы-

сокую, чем температура переохлаждения исследуемого грунта. При этом грунт оставался в переохлажденном состоянии до конца опыта, в нашем случае до 2,5 суток. Мы не ставили перед собой цель провести более длительные эксперименты, так как температура воздуха, а следовательно и грунта, в весенний период резко меняется даже в течение суток. При проведении опытов было выявлено, что замораживание в условиях постоянного встряхивания повышает температуру переохлаждения, но не оказывает влияния на температуру замораживания. Уплотнение же грунтов, имеющих одну и ту же влажность по массе, не оказывает влияния ни на то ни на другое.

Довольно четко прослеживается зависимость температур переохлаждения и замораживания грунтов от влажности. На рис. 2 приведены графики, характеризующие зависимость температур переохлаждения минеральных грунтов от исходной влажности.





**Рис. 2.** Зависимость температур переохлаждения грунтов от влажности  
**I.** 1 — подпахотный слой, ОПХ Северного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (СевНИИГиМ), поле 6; 2 — то же, дальнее поле; 3 — то же, поселок им. Э. Тельмана. Ленинградская обл.;  
**II.** Песок: 1 — крупнозернистый, 2 — среднезернистый, 3 — мелкозернистый

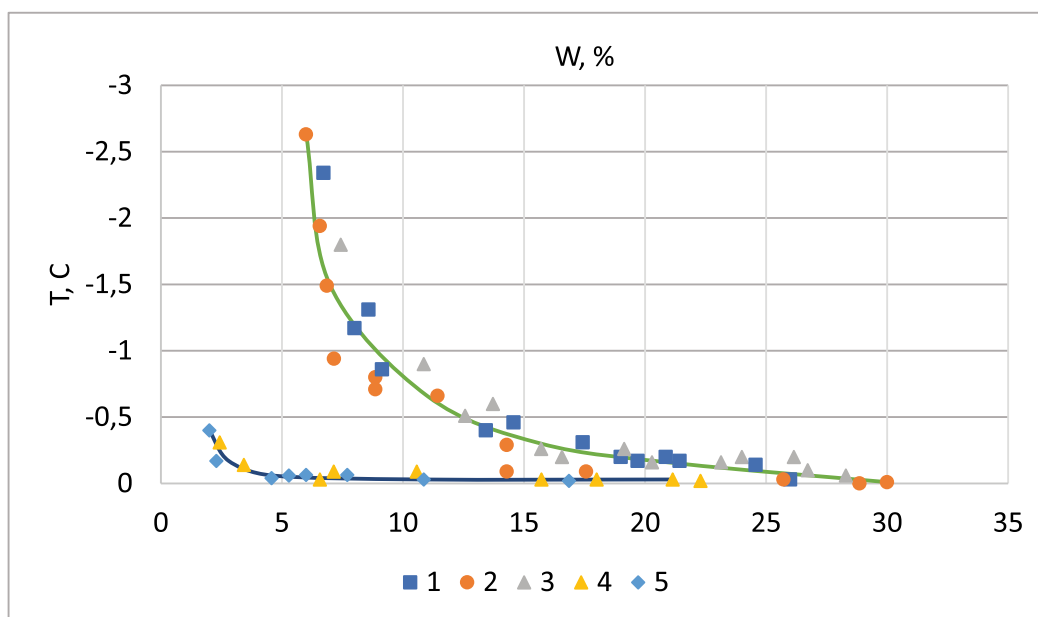
Несмотря на различие в механическом составе исследованных грунтов, все кривые имеют много общего: на левом своем конце они обращены выпуклостью вниз. С увеличением влажности температура переохлаждения сначала повышается, затем, достигнув максимального значения, начинает понижаться и, наконец, принимает постоянное значение. В соответствии с [2] характер приведенных кривых можно объяснить следующим образом. При влажности грунта ниже максимальной гигроскопической влажности вода в нем сосредоточена в основном на поверхности частиц, которые оказывают сильное влияние на структуру воды, что является препятствием для ее кристаллизации.

Вода сверх максимальной гигроскопической влагоемкости связана рыхло и по своим свойствам близка к свободной, но трансляционное движение молекул в ней, мешающее перестройке ее структуры при замерзании, существенно меньше, чем в свободной воде. Поэтому и температуры переохлаждения грунтов при их влажности, соответствующей содержанию рыхлосвязанной воды, соответственно, выше. При дальнейшем увеличении влажности, например сверх максимальной молекулярной влагоемкости, происходит увеличение трансляционного движения молекул воды, что уменьшает междипольный ориентационный эффект между полярными молекулами воды, понижая температуру переохлаждения. Увеличение содержания в порах грунта свободной воды вплоть до полной влагоемкости не понижает температуры переохлаждения, так как структура воды не претерпевает изменений. При этом влажность, соответствующая максимальной величине температуры переохлаждения, за-

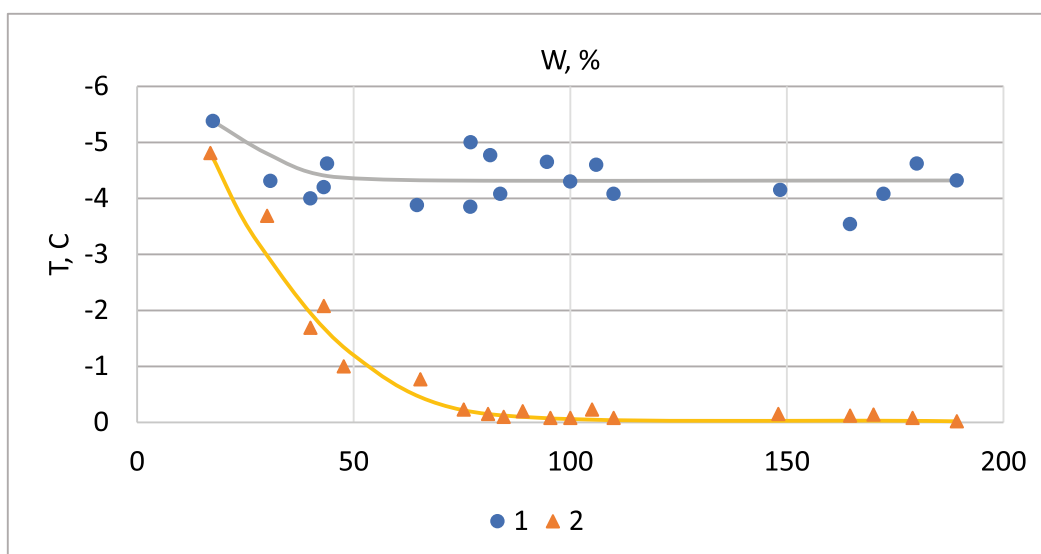
висит от разновидности грунта: крупнозернистый песок — 2,5 %, мелко- и среднезернистый песок — 7,5 %, подпахотный слой ОПХ СевНИИГиМ — 15 %.

Из рассмотрения кривых температур переохлаждения грунтов, а также кривых механического состава видно, что с увеличением степени дисперсности грунта величина влажности последнего, соответствующая максимуму температуры переохлаждения, возрастает. Почва подпахотного слоя из ОПХ СевНИИГиМ по сравнению с исследованными почвами из пахотного слоя содержит большее количество частиц <0,01 мм, и температуры переохлаждения его во всем диапазоне влажности существенно ниже. Таким образом, на величину температур переохлаждения грунтов оказывает большее влияние степень дисперсности грунта, чем содержание в них органических веществ.

В отличие от температур переохлаждения температуры замерзания как для песка, так и для почв пахотного и подпахотного слоев аппроксимируются одной кривой (рис. 3). При этом с уменьшением исходной влажности температуры замерзания почв также понижаются. К сожалению, при малых величинах влажности очень трудно зафиксировать температурный скачок, так как температура замерзания прочносвязанной воды по мере уменьшения ее содержания за счет фазовых переходов изменяется непрерывно и быстро. Кроме того, при уменьшении исходной влажности температуры переохлаждения и замерзания грунтов по величине становятся близкими и, видимо, при дальнейшем ее уменьшении должны совпасть (рис. 4).



**Рис. 3.** Зависимость температур замерзания грунтов от влажности.  
Грунты: 1–3 — см. рис. 2; 4 — мелкозернистый песок; 5 — крупнозернистый песок



**Рис. 4.** Зависимость температур переохлаждения (1) и замерзания (2) торфяника от исходной влажности. Зольность 41,35 %

## Выводы

1. Уплотнение грунтов, имеющих одну и ту же влажность, не оказывает влияния на температуру их переохлаждения и замерзания.

2. Температуры переохлаждения и замерзания грунтов зависят в большей степени от их дисперсности и исходной влажности, чем от содержания органических веществ.

3. При влажностях грунтов меньших, чем величина, соответствующая максимальному значению температур их переохлаждения, характер изменения кривых переохлаждения и замерзания одинаков, причем с уменьшением влажности температуры переохлаждения и замерзания грунтов понижаются, приближаясь друг к другу по величине.

## Библиографический список

1. Андрианов П. И. Температуры замерзания грунтов / Труды Дальневосточной комплексной экспедиции. СОПС АН СССР. Комиссия по изучению вечной мерзлоты. Вып. 1. М.: АН СССР, 1936. С. 17–54.
2. Ананян А. А. Молекулярно-кинетические представления о строении жидкой фазы воды, содержащейся в тонкодисперсных горных породах / Мерзлотные исследования: сб. ст. / геол. фак., кафедра мерзлотоведения. Вып. 7. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. С. 22–36.
3. Гречищев С. Е., Павлов А. В., Шешин Ю. Б. и др. Экспериментальные закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Криосфера Земли. 2004. Т. 8, № 4. С. 41–44.
4. Гречищев С. Е., Павлов А. В., Гречищева О. В. Закономерности предкристаллизационного переохлаждения поровой влаги дисперсных грунтов в градиентном поле температур // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 4. С. 56–58. EDN HVUXQH.
5. Barra, Giuseppina & Matteo, P. & Vittoria, V. & Sesti Osseo, Libero & Cesàro, Attilio. A DSC Study of Thermal Transitions of Apple Systems at Several Water Contents. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. 61. 351–362. 10.1023/A:1010148913394.
6. Liesebach, Jens & Lim, Miang & Rades, Thomas. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC. *Thermochimica Acta — THERMOCHIM ACTA*. 2004. 411. 43–51. 10.1016/j.tca.2003.07.005.
7. Старостин Е. Г., Петров Е. Е., Николаев С. В. Влияние темпа охлаждения на переохлаждение поровой воды в грунтах // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. 2012. Т. 9, № 4. С. 47–51. EDN RDXBP.
8. Белкова Е. А., Мотенко Р. Г., Гречищева Э. С. Влияние температурного режима на температуру начала замерзания грунтов разного гранулометрического состава при ее экспериментальном определении // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: материалы XVI Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, Москва, 1–3 декабря 2021 года. / ООО «Геомаркетинг»; ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»; ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» — Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. М.: Геомаркетинг, 2021. С. 378–385. EDN AOJLCL.
9. Старостин Е. Г. Определение количества незамерзшей воды по кинетике кристаллизации. // Криосфера Земли. 2008. Т. 12, № 2. С. 60–64. EDN JTGMBW.
10. Коновалов А. А. Связь температур переохлаждения и кристаллизации влажного грунта с его прочностью в мерзлом состоянии // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88, № 5. С. 1043–1049. EDN UKBVVL.
11. Bo-Quan Lu, Shu-Ying Zang, Li-Quan Song, et al. Cooling and wetting of soil decelerated ground freezing-thawing processes of the active layer in Xing'an

permafrost regions in Northeast China, *Advances in Climate Change Research*. 2023. Vol. 14, iss. 1. P. 126–135. ISSN 1674–9278. DOI: 10.1016/j.accre.2023.01.002.

12. Ван С., Колос А. Ф., Петряев А. В. Математическое моделирование процесса промерзания грунтов земляного полотна железных дорог в условиях холодного климата // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб.: ПГУПС, 2022. Т. 19, вып. 4. С. 820–831. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-820-831.

13. Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A., Bushuev. N. S. Stress-strain state of elastic base under circular foundation // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint Petersburg, 6–8 February 2019*. Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. P. 341–346. DOI: 10.1201/9780429058882-66. EDN XTGDMT.

14. The Impact of Engineering-geologic Conditions on the Development of Railway Subgrade Design Solutions / V. A. Alpysova, N. S. Bushuev, S. V. Shkurnikov,

et. al. // *Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG-2017)*, Saint Petersburg, 17–19 May 2017. Saint Petersburg, 2017. P. 752–758. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2017.05.118. EDN XNBLBA.

15. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov, et. al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. Saint Petersburg, 15–22 April 2019. Vol. 2. Singapore: Springer Nature, 2019. P. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9\_23. EDN RCVFWH.

Дата поступления: 11.11.2023

Решение о публикации: 23.12.2023

**Контактная информация:**

ШТЫКОВ Валерий Иванович — докт. техн. наук, профессор; shtykov41@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук, доцент; pol1nom@yandex.ru

ЯНКО Юрий Григорьевич — канд. техн. наук; yanko@agrophys.ru

## On the dependence of soil freezing on humidity

V. I. Shtykov<sup>1</sup>, A. B. Ponomarev<sup>1</sup>, Yu. G. Yanko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdansky pr., Saint Petersburg, 195220, Russia

**For citation:** *Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Yanko Yu. G.* On the dependence of soil freezing on humidity // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 22–31. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-22-31. (In Russian)

### Abstract

**Purpose:** the temperatures at which soils begin to freeze during the onset of frost are of interest primarily to agricultural workers and construction workers. It was previously established that many factors influence soil freezing. However, not enough research has been carried out on the influence of individual factors on the freezing process. The article examines the influence of soil moisture on their supercooling and freezing temperatures. **Methods:** the studies were carried out in a microrefrigerator with three freezing modes. **Results:** it was found that with constant shaking, the supercooling temperature increased, but the freezing temperature did not change. Graphic dependences of the temperatures of supercooling and freezing of soils on the initial humidity were obtained. The degree of soil compaction did not affect these temperatures. The temperatures of supercooling and freezing of soils depend to a greater extent on the dispersion of soils than on the content of organic substances in them. **Practical significance:** the results of the work are important for construction as they expand the understanding of the features of the mechanism of soil freezing.

**Keywords:** soil supercooling, soil, soil freezing, cooling regimes, soil water, supercooling temperature, humidity.

### References

1. Andrianov P. I. Temperatury zamerzaniya gruntov / Trudy Dal'nevostochnoj kompleksnoj jekspedicii. SOPS AN SSSR. Komissija po izucheniju vечноj merzloty. Vyp. 1. M.: AN SSSR, 1936. S. 17–54. (In Russian)
2. Ananjan A. A. Molekuljarno-kineticheskie predstavlenija o stroenii zhidkoj fazy vody, sodержashhejsja v tonkodispersnyh gornyh porodah / Merzlotnye issledovaniya: sb. st. / geol. fak., kafedra merzlotovedeniya. Vyp. 7. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1967. S. 22–36. (In Russian)
3. Grechishhev S. E., Pavlov A. V., Sheshin Ju. B. i. dr. Jeksperimental'nye zakonomernosti formirovaniya pereohlazhdenija porovoj vlagi pri ob'emnom zamerzanii dispersnyh gruntov // Kriosfera Zemli. 2004. T. 8, № 4. S. 41–44. (In Russian)
4. Grechishhev S. E., Pavlov A. V., Grechishheva O. V. Zakonomernosti predkristallizacionnogo pereohlazhdenija porovoj vlagi dispersnyh gruntov v gradientnom pole temperatur // Kriosfera Zemli. 2006. T. 10, № 4. S. 56–58. EDN HVUXQH. (In Russian)
5. Barra, Giuseppina & Matteo, P. & Vittoria, V. & Sesti Osseo, Libero & Cesàro, Attilio. A DSC Study of Thermal Transitions of Apple Systems at Several Water Contents. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2012. 61. 351–362. 10.1023/A:1010148913394.
6. Liesebach, Jens & Lim, Miang & Rades, Thomas. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC. Thermochemica Acta — THERMOCHIM ACTA. 2004. 411. 43–51. 10.1016/j.tca.2003.07.005.
7. Starostin E. G., Petrov E. E., Nikolaev S. V. Vliyanie tempa ohlazhdenija na pereohlazhdenie porovoj vody v gruntah // Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova. 2012. T. 9, № 4. S. 47–51. EDN RDFXBP. (In Russian)

8. Belkova E. A., Motenko R. G., Grechishheva Je. S. Vliyanie temperaturnogo rezhima na temperaturu nachala zamerzaniya gruntov raznogo granulometricheskogo sostava pri ee jeksperimental'nom opredelenii // Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii: materialy XVI Obshherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii izyskatel'skih organizacij, Moskva, 1–3 dekabrja 2021 goda / OOO “Geomarketing”; OOO “Institut geotekhniki i inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve”; asociacija “Inzhenernye izyskanija v stroitel'stve” — Obshherossijskoe otraslevoe ob#edinenie rabotodatelej Sojuz izyskatelej. M.: Geomarketing, 2021. S. 378–385. EDN AOJCL. (In Russian)
9. Starostin E. G. Opredelenie kolichestva nezamerzshej vody po kinetike kristallizacii // Kriosfera Zemli. 2008. T. 12, № 2. S. 60–64. EDN JTGMWB. (In Russian)
10. Konovalov A. A. Svjaz' temperatur pereohlazhdenija i kristallizacii vlazhnogo grunta s ego prochnost'ju v merzлом sostojanii // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 2015. T. 88, № 5. S. 1043–1049. EDN UKBV-VL. (In Russian)
11. Bo-Quan Lu, Shu-Ying Zang, Li-Quan Song, et al. Cooling and wetting of soil decelerated ground freezing-thawing processes of the active layer in Xing'an permafrost regions in Northeast China, *Advances in Climate Change Research*. 2023. Vol. 14, iss. 1. P. 126–135. ISSN 1674–9278. DOI: 10.1016/j.accre.2023.01.002.
12. Van S., Kolos A. F., Petraev A. V. Matematicheskoe modelirovanie processa promerzaniya gruntov zemljanogo polotna zheleznyh dorog v uslovijah holdnogo klimata // *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. SPb.: PGUPS, 2022. T. 19, vyp. 4. S. 820–831. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-820-831. (In Russian)
13. Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A., Bushuev N. S. Stress-strain state of elastic base under circular foundation // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint Petersburg, 6–8 February 2019*. Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. P. 341–346. DOI: 10.1201/9780429058882-66. EDN XTGDMT.
14. The Impact of Engineering-geologic Conditions on the Development of Railway Subgrade Design Solutions / V. A. Alpysova, N. S. Bushuev, S. V. Shkurnikov, et. al. // *Proceedings of the International Scientific Conference Transportation Geotechnics and Geoecology (TGG-2017)*, Saint Petersburg, 17–19 May 2017. Saint Petersburg, 2017. P. 752–758. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2017.05.118. EDN XNBLBA.
15. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov, et. al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. Saint Petersburg, 15–22 April 2019. Vol. 2. Singapore: Springer Nature, 2019. P. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9\_23. EDN RCVFWH.

Received: 11.11.2023

Accepted: 23.12.2023

**Author's information:**

Valery I. SHTYKOV — PhD in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru

Andrei B. PONOMAREV — PhD in Engineering, Associate Professor; pol1nom@yandex.ru

Yuri G. YANKO — PhD in Engineering; yanko@agrophys.ru

УДК 2.3.3

## Разработка и применение программы для автоматического нахождения невязки при пространственном контроле режимной метеорологической информации

**А. И. Честнов**

Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79

**Для цитирования:** Честнов А. И. Разработка и применение программы для автоматического нахождения невязки при пространственном контроле режимной метеорологической информации // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 32–46. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-32-46

### Аннотация

**Цель:** разработать и применить программное обеспечение для автоматического нахождения невязок в автоматизированных метеорологических станциях с целью выявления сомнительных и недостоверных данных без непосредственного ручного контроля на языке Fortran с применением запросов языка программирования PostgreSQL. Написать блок программы для обработки данных из архива базы данных метеорологических станций единой сети. Установив соединение, с помощью запросов обеспечить поступление данных усредненных значений 10-минутных метеорологических сводок по специальной методике обработки. Составить подпрограмму для решения уравнения методом наименьших квадратов матричным методом, сопоставить для проверки результатов ее с методом линейной регрессии в стороннем приложении. Обеспечить должную запись данных перед отправкой их в базу данных, подготовить необходимую таблицу для корректной демонстрации данных и удобства пользователя в их использовании. Сформулировать корректные запросы для отправки в базу данных результатов нахождения невязки. Сформулировать запросы для создания необходимой таблицы, сформулировать запросы и выявить условия для реализации программы для ее более гибкого функционирования, то есть возможность обработки данных и нахождения невязки в случае неежедневной работы программы. **Методы:** методика схожа с принципами рекомендаций по анализу результатов пространственного контроля режимной метеорологической информации Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Методы включают перевод координат в декартову систему и реализацию решения систем уравнения методом наименьших квадратов. **Результаты:** создана программа, способная работать без участия оператора, производящая автоматический запуск, обработку данных и запись данных для дальнейшего хранения. **Практическая важность:** программа позволяет получать данные оперативно благодаря быстрой скорости обработки без ошибок, вызванных человеческим фактором.

**Ключевые слова:** невязка, автоматическая обработка, метеостанции, язык программирования Fortran, PostgreSQL.

Метеорологическая информация играет важную роль в обеспечении судоходства морского и речного транспорта, дорожной инфраструктуры, как в автомобильной, так и в железнодорожной. Исправное функцио-

нирование автоматических метеорологических станций позволяет удовлетворить нужды гидрометеорологического обеспечения служб, нуждающихся в нем без привлечения большого количества людей, что снижает



потребность людских ресурсов и помогает экономить денежные [1–2].

Помимо этого, информация от автоматических метеорологических станций поступает намного более оперативно, чем от неавтоматизированных, на которых измерение, запись и отправка данных происходят дежурным инженером-синоптиком или метеорологом. Только на автоматических станциях возможна постоянная запись и отправка десятиминутных сводок, которые используются для оперативных прогнозов погоды, корректирующие долгосрочные [3–4].

Оперативные прогнозы незаменимы для автомобильной дорожной инфраструктуры и в авиационной метеорологии. Они позволяют своевременно предупреждать опасные явления погоды, такие как обледенение; это позволит оперативно известить водителей на автомагистралях через электронное табло или отменить рейс в аэропорту для недопущения создания опасных ситуаций при перелете воздушного судна [5].

При огромном количестве преимуществ автоматические метеорологические станции имеют и ряд недостатков. Они выходят из строя в отличие от неавтоматизированных. Как правило, предупредить поломку или выход из строя прибора или всей станции очень тяжело. Если инженер-синоптик при очередном замере находит дефект или ущерб от чего-либо, нанесенный конструкции, и может оперативно устранить его, то поломки и проблемы автоматических метеостанций выявляются сильно позже при анализе данных, присылаемых оттуда.

Дефектов может быть много, как повреждение средства телекоммуникации, когда данные повреждаются при передаче или не доходят вовсе, так и неисправность датчиков, отправляющие неверную информацию.

При отсутствии данных или их малом количестве проблема выявляется быстро очень беглым анализом полноты данных. Достаточно сопоставить количество приходящих данных в небольшом интервале, например в суточном, с типом автоматической метеостанции. Так, в метеостанциях, присылающих 10-минутные сводки, должно за сутки приходиться 144 значения. При поступлении менее 86 значений, то есть 60% от общего числа возможных, прогноз по этой метеостанции становится недостоверным, а канал связи, приемник или передатчик показателей нуждается в ремонте [6].

Совсем другое дело обстоит с недостоверными показателями самих датчиков. На неавтоматизированных станциях синоптик самостоятельно может определить сбои в показателях при проверке метеоплощадки или даже при снятии показателей, если дефект прибора виден сразу. В таком случае производится ремонт на месте или замена. Такие метеостанции часто считаются контрольными: показания автоматических сверяются с ними при расположении в одном радиусе 150 км [7].

Несмотря на относительную близость расположений, показания не должны полностью совпадать друг с другом, поэтому выявление сомнительных и недостоверных данных требует комплексного и сложного анализа.

Данный анализ результатов был разработан Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды специалистами Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (далее — ГГО) и издан в 1993 году Санкт-Петербургским «Гидрометеоздатом». Он изложен в рекомендациях по анализу пространственного контроля режимной метеорологической информации, являясь переработанным и дополненным

изданием «Методических указаний по проведению критического контроля результатов метеорологических наблюдений на сети станций» 1981 года [8].

Данные рекомендации предназначены для специалистов, занимающихся автоматизацией и осуществляющих контроль сетей метеостанций в целом.

Программа для автоматического нахождения невязки основана на методе пространственной интерполяции. Данная методика применима для района с нахождением от 3 метеостанций в схожих условиях рельефа местности. По данным метеостанций рассчитывается пространственное распределение величины в одной координатной плоскости. Происходит расчет невязки контролируемой станции с влияющими, что позволит определить, насколько сильно расходятся данные, учитывая ошибочные и сомнительные.

Первым действием происходит пересчет координат метеостанций в декартовы координаты с началом:

$$\begin{aligned} x_i &= 111,2(\lambda_0 - \lambda_i) \cos \frac{\varphi_0 + \varphi_i}{2}, \\ y_i &= 111,2(\varphi_0 - \varphi_i). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i$  — номер влияющей станции;  $\lambda_i$  и  $\varphi_i$  — соответственно широта и долгота станции;  $\lambda_0$  и  $\varphi_0$  — координаты контролируемой станции. 111,2 — расстояние между  $1^\circ$  оси Земли [9].

Второе действие — расчет пространственного распределения как полином первой степени от коэффициентов  $x$  и  $y$ .

$$f(x, y) = Ax + By + C. \quad (2)$$

Коэффициенты полинома  $A$ ,  $B$  и  $C$  определяются методом наименьших квадратов

по измеренным значениям контролируемой величины  $P'_i$  на влияющих станциях.

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i) - P'_i]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n (Ax_i + By_i + C - P'_i)^2_{\min} \end{aligned} \quad (3)$$

Условие будет выполнено, если отношение коэффициентов полинома будет равно 0.

$$\partial S / \partial A = 0; \quad \partial S / \partial B = 0; \quad \partial S / \partial C = 0. \quad (4)$$

То есть получится следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i y_i + C \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i P'_i &= 0 \\ A \sum_{i=1}^n x_i y_i + B \sum_{i=1}^n y_i^2 + C \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n y_i P'_i &= 0 \\ A \sum_{i=1}^n x_i + B \sum_{i=1}^n y_i + Cn - \sum_{i=1}^n P'_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решение системы уравнений методом наименьших квадратов дает следующие значения для коэффициентов полинома:

$$D = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$Dc = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i P_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i P_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n P_i \end{vmatrix}$$

Значение полинома контролируемой величины равняется отношению двух полиномов друг к другу:

$$C = Dc / D. \quad (7)$$

И наконец, пространственная невязка равняется разности между полиномом контролируемой величины и среднего значения контролируемой станции за конкретный временной период:

$$\Delta = C - Pi. \quad (8)$$

Для корректной работы программы достаточно реализовать формулу пересчета координат в декартовы, а также нахождение двух полиномов после получения значения, выдаваемого на метеостанциях за определенный период.

Рекомендации ГГО рассчитаны для нахождения месячных невязок, однако принцип может распространяться и на декаду и даже на сутки, единственное — критерий достоверности данных будет отличаться [10].

Примером нахождения невязки послужит обработка данных белорусских автоматических метеостанций «Белгидромет» (рис. 1).

Необходимые данные с метеостанций хранятся на серверах в виде таблиц. Таблицы включают в себя идентификационный номер метеостанции из хранилища данных и идентификационный номер из таблицы координат. Для обработки в компиляторе их необходимо получить с помощью запроса на сервер, для этого подходит язык PostgreSQL, а вернутся данные в виде таблиц с помощью подпрограммы GetData АМО, разработанной специалистами Института радарной метеорологии [11].

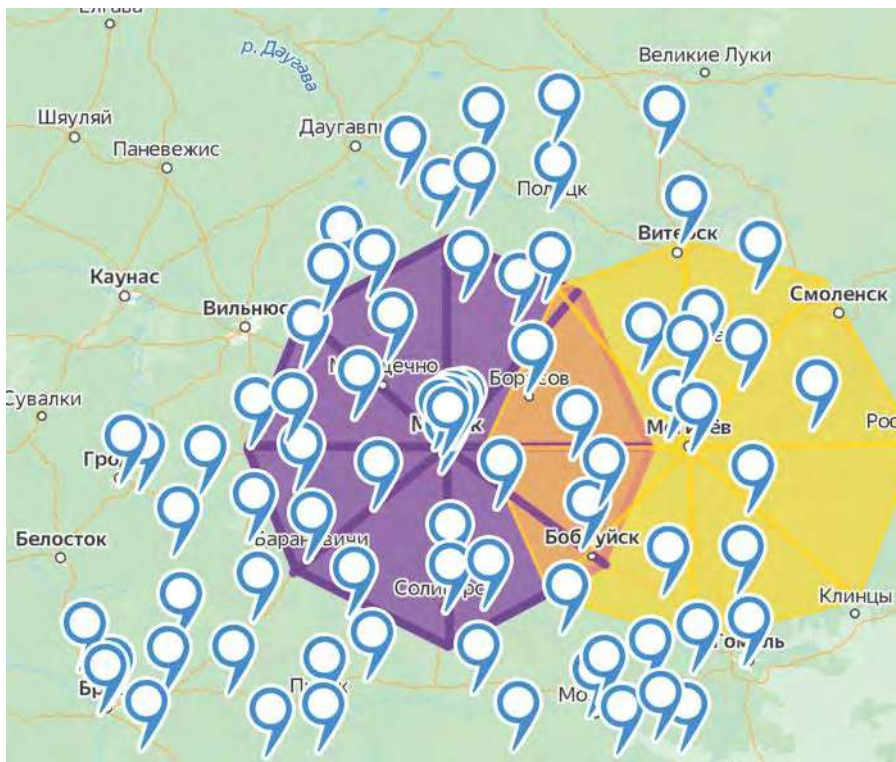


Рис. 1. Расположение метеостанций на территории Республики Беларусь

Запрос должен включать в себя нахождение нужного идентификационного номера и координаты, но при этом `id` необходимо заменить соответствующим из таблицы с данными.

В этом запросе идет преобразование данных и вывод их в отдельную переменную с соответствующими столбцами, чтобы колонка с координатами превратилась в две колонки, одна с долготой, вторая с широтой (табл. 1).

Субрутина (подпрограмма) `GetData АМО` возвращает многомерный массив структур,

ТАБЛИЦА 1. Результат запроса координат станций

id	locid	latitude	longitude
61	49	51.79667	30.2475
58	46	54.73333	28.35
62	50	52.11667	23.68583
63	51	52.25194	29.84056
64	52	55.82083	27.94
68	56	54.1	26.51667

размерность которого заранее задается в подпрограмме, в данном случае его размер равен 4 (рис. 2).

Далее из массива делается список. В языке Fortran, к сожалению, такого элемента нет, как в Python или в других языках, поэтому в качестве списка идет строка с элементами. Для ее получения необходимо преобразовать `g_Tuples` в более удобоваримый для обработки вид массива. Преобразование происходит с помощью функции `read`. Когда массив создан заранее и алоцирован, то есть для него выделена память на создание, запись и хранение, происходит чтение элементов из массива `g_Tuples` и присвоение им имени.

Чтение первого поля массива, его значения и размера, преобразование элемента в `integer`, то есть в целое число (идентификационный номер станции должен быть всегда целым, без цифр после запятой) и присваивание ему имени `id`. То же самое необходимо проделать с остальными элементами.

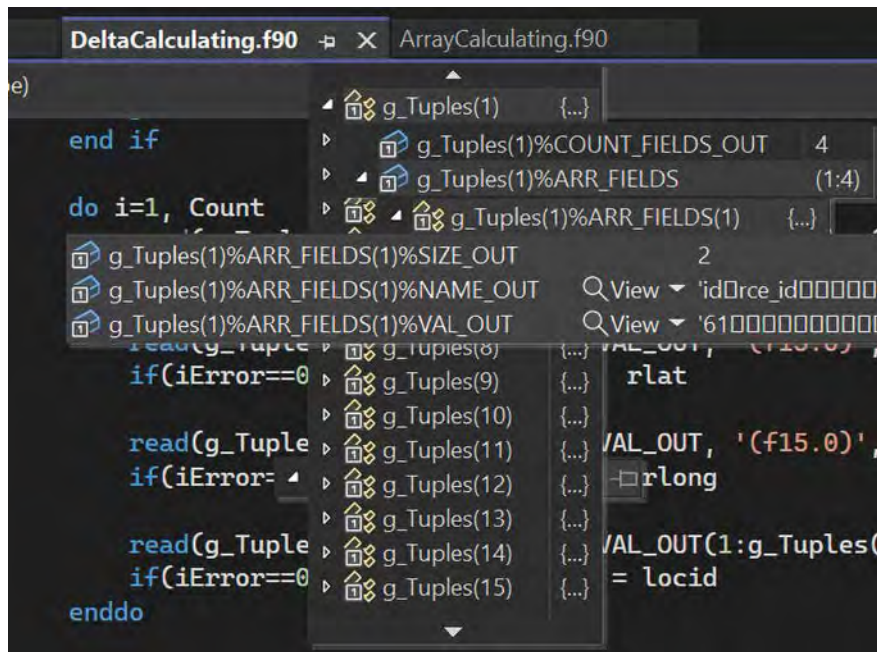


Рис. 2. Структура массива `g_Tuples`

Для последующей обработки значения широты и долготы преобразуются в вещественные, с 12 знаками после запятой без округления. Так как речь идет о координатах, необходима серьезная точность. Преобразуется точно так же, но вместо (i) прописывается (f15.0).

Когда массив готов, создается цикл, проходящий по всем элементам, с первого до последнего. Это позволит определить для каждой метеостанции соседние метеостанции, невязки которых необходимо найти и сравнить. Для определения соседних станций создается еще один SQL-запрос [12] (рис. 3).

В данном запросе происходит расчленение колонки с координатами на широту и долготу (x и y соответственно) из базы данных по расположению станций, далее к выбранным идентификационным номерам присоединяются соответствующие номера станций из архива с данными по внешнему ключу. Условием для получения списка также является и идентификационный номер станции из базы данных по расположению, и само расстояние в метрах, то есть в 150 км [13] (рис. 4).

Для нахождения среднего значения достаточно получить лишь список станций для отправки его в виде запроса SQL в базу данных.

```
select s.id, sl.id as locid, ST_Y(sl.point::geometry) as latitude,
ST_X(sl.point::geometry) as longitude
from info.source_location sl
inner join info.source s on sl.id = s.location_id
where ST_DWithin(sl.point, (select point from info.source_location sl2 where sl2.id = 49), 150000
```

Рис. 3. Скрипт для нахождения станций в радиусе 150 км

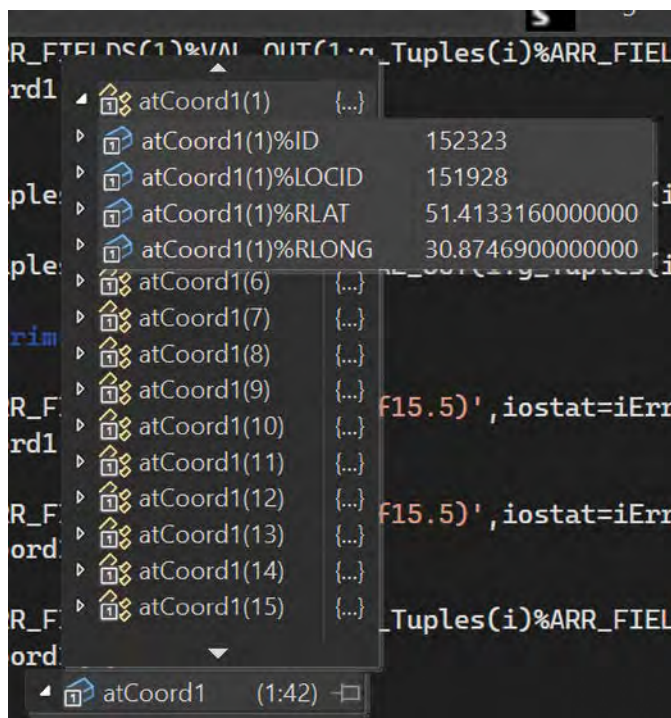


Рис. 4. Получившийся массив станций в радиусе 150 км, 42 метеостанции

В зависимости от периода, в котором происходит нахождение невязки, усреднение метеорологического параметра, в данном случае среднего значения температуры воздуха, команда будет немного отличаться [14].

Метеорологическое усреднение отличается от обычного математического дроблением на мелкие периоды. Сначала идет нахождение среднего значения для каждой 10-минутной сводки, из этих средних значений усредняется за один час, из них — суточное, из суточных — декадное, из декадных — месячное значения для каждой метеостанции [15].

Запрос для нахождения среднего значения температуры воздуха в архивах выглядит следующим образом (рис. 5).

Происходит усреднение по данным за один конкретный день, в данном случае за 30 августа 2023 года, с условием целостности данных не менее 60%. Это достигается последним действием, где заданы условия счетчику.

Аналогично сделаны запросы для трех декад месяца и месяца целиком, только там поставлены другие условия: у декад —

не меньше 864 значений наблюдений, у месяца — не менее 2600. Касаемо календарных декад возникает трудность в количестве дней, в третьей декаде может быть как 8 дней в феврале, так и 11 в октябре. Начало у третьей декады всегда одинаково, но конец разный, зато достоверно известно, что она ограничена началом следующего месяца, поэтому условие запроса должно исполняться тем, что диапазон дат строго меньше первого числа следующего месяца, то есть:

```
and time_obs > '2023-08-21' and time_obs
<= '2023-09-1'
```

После того как массивы со средними значениями были найдены, можно приступить к реализации формул. Первое действие — перевод всех координат, каждой метеостанции в декартову. Необходимо пройти циклом по каждой, поставив в формулу 1 [16] (рис. 6).

После перевода в систему все  $x$  и  $y$  суммируются для нахождения определителя матрицы, он находится через разницу треугольников умножения (рис. 7).

```
with AllBase as (select source_id, count(time_obs), avg(value_float[1]) as value_10min,
time_obs from meteo_point.surface_synoptic ss where value_float[1] is not null and source_id
in(152845,57,58,60,65,74,84,92,95,15588,88,15590,99,102,106,110,111,4378,5666,15647,15648,15646)
and time_obs > '2023-08-30' and time_obs <= '2023-08-31'
and measurand_id = 10 group by (source_id, time_obs)),
OneHour as (select source_id, avg(value_10min) as value_1h, (date_trunc('hour',time_obs)) as time_obs_H
from AllBase group by (source_id, time_obs_H) having count(time_obs) >= 4)
select avg(value_1h) as value, source_id
from OneHour group by (source_id) having count(value_1h) >= 24*0.6;
```

Рис. 5. Скрипт для нахождения среднего значения за определенный период

```
do m = 1, iStatInArea
  arXc(m) = (111.2 * (atAll_inout(i).rLat - arXc(m)) * cos((arYc(m) + atAll_inout(i).rLong)/2))
  arYc(m) = 111.2 * (atAll_inout(i).rLong - arYc(m))
end do
```

Рис. 6. Цикл для перевода данных в декартову систему

Для реализации нахождения определителя матрицы заранее создаются переменные, а потом подставляются в формулу (рис. 8).

Последними действиями остаются реализация формулы 7 и 8. Проверка осуществлялась вручную, но вместе с тем на Python была написана схожая программа для проверки, реализовывалась через функцию линейной регрессии библиотеки `sklearn.linear_model`.

Для реализации функции линейной регрессии был создан пустой массив для дальнейшего заполнения с именем `models` (рис. 9).

Во встроенную функцию линейной регрессии подается массив `X`, содержащий относительные координаты, то есть преобразованные в декартову систему и массив `Y`, в котором содержатся средние значения. После этого находится полином `C`, равный интерцепту, то есть перехвату значения `x`, когда на графике регрессии на своей оси координат оно равно 0. После этого из значения интерцепта вычитается среднее значение по станции. Оно совпадает с тем, что получилось в Fortran. Таким образом, выполнена

$$\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{vmatrix}$$

Рис. 7. Пример нахождения определителя матрицы

```

sum_x = sum(x)
sum_y = sum(y)
sum_x2 = sum(x**x)
sum_y2 = sum(y**y)
XiYi = sum(x**y)
Ni = size(atDayMean)-1
sum_FX = sum(x*atDayMean.rvalue)
sum_FY = sum(y*atDayMean.rvalue)

sum_F = sum_FALL - atDayMean(n)%rvalue
D = (sum_x2 * sum_y2 + Ni) + (sum_x * XiYi * sum_y) + (XiYi * sum_y * sum_x) - (sum_x2 * sum_y * sum_y) - (XiYi * XiYi * Ni)
Dc = (sum_x2 * sum_y2 + sum_F) + (sum_x * XiYi * sum_Fy) + (XiYi * sum_y * sum_Fx) - (sum_x * sum_y2 * sum_Fx) - (sum_x2 * sum_y * sum_Fy) - (XiYi * XiYi * sum_F)
C = Dc/D
Delt = (C - atDayMean(n)%rvalue)
atDayMean(n)%rDelta = Delt

```

Рис. 8. Реализация нахождения определителя матрицы

```

def getNumbers():
    models = []
    for i in range(0, len(X)):
        x_fit = np.delete(X[i], i, 0)
        y_fit = np.delete(Y, i, 0)
        models.append(LinearRegression().fit(x_fit, y_fit))
    return models
models = getNumbers()

ints = [ x.intercept_ for x in models]

```

Рис. 9. Реализация линейной регрессии в Python

двойная проверка, автоматическая и ручная, когда матричные уравнения решались самостоятельно (рис. 10).

Полученные значения записываются в отдельный массив, он необходим для дальнейшей записи значений в базу данных, которые также выполняются с помощью SQL-запроса.

Для написания его и передачи данных через подпрограмму GetData АМО необходимо создать строку, в которую будут укладываться нужные даты и значения невязок. Сначала создаются общие элементы строки, после они соединяются с переменными в зависимости от их значения. Перед записью данных создаются секции таблиц. Секционирование таблиц позволяет в дальнейшем оптимизировать про-

цесс поиска и фильтрации данных, что незаменимо для больших архивов (рис. 11).

Этот запрос создает секции в таблице, значения которых должны будут удовлетворять требованиям. Данные, которые пойдут на запись не в промежутке с 25 по 26 августа 2023 года, просто не будут занесены в нее.

Для передачи данных из компилятора используется подпрограмма GetData АМО с собранной строкой.

После создания секций последним действием является запись данных в саму таблицу, осуществляется через простую команду insert into (рис. 12).

Собирается строка аналогично, как строка для запроса создания секций; отправляется в базу данных тоже через GetData АМО.

atDayMean(1)%ID	61
atDayMean(1)%RVALUE	18.25403
atDayMean(1)%RLAT	51.7966670000000
atDayMean(1)%RLONG	30.2475000000000
atDayMean(1)%RDELTA	-0.294360429602428
atDayMean(7)	{...}

Рис. 10. Полученный массив после обработки

```
CREATE table if not exists [имя схемы]."[имя таблицы]_[имя секции]_2023_08-25"
PARTITION OF [имя таблицы]_[имя секции]
FOR VALUES FROM ('2023-08-25 00:00:00')
TO ('2023-08-26 00:00:00');
```

Рис. 11. Скрипт для создания секции таблицы

```
INSERT INTO [имя схемы]. [имя таблицы]
(source_id, measurand_id, processing_id, period_id, time_obs, time_cutoff, time_rec, value_float)
VALUES (61, 10, 14, 4, '2023-08-25 00:00:00',
'2023-10-20 10:21:55', timezone('UTC', NOW()), '{ -0.86}');
```

Рис. 12. Скрипт для добавления данных в таблицу



Source\_id отвечает за идентификационный номер метеостанции; measurand\_id — за измерение; processing\_id — за манипуляцию с измерением, то есть в данном случае невязку; period\_id — за временной период для невязки, день, месяц или календарная декада. Time\_obs — время наблюдения метеорологического параметра, time\_cutoff — время прекращения подачи сигнала, time\_rec — время записи в таблицу, value\_float — само значение (рис. 13).

Таким образом, схема одного цикла имеет следующий вид (рис. 14).

Программа рассчитана на полную автоматизацию и гибкость в использовании. Цикл проходит по всем метеостанциям в архиве, это значит, у каждой будет обнаружен радиус в 150 км, для каждой найдется невязка.

Последняя задача заключается в применении программы. Возможно, ее не удастся запускать каждый день для составления невязок месячных, декадных и дневных. В связи с этим была создана еще одна подпрограмма, определитель даты, базирующаяся на модуле MOD\_TIME, тоже созданная специалистами

source_id	measurand_id	processing_id	period_id	time_obs	time_cutoff	time_rec
58	10	14	4	2023-05-02 00:00:00.000	2023-09-22 06:41:00.000	2023-09-22 06:41:00.000
58	10	2	4	2023-05-02 00:00:00.000	2023-09-22 06:41:00.000	2023-09-22 06:41:00.000
62	10	14	4	2023-05-02 00:00:00.000	2023-09-22 06:41:00.000	2023-09-22 06:41:00.000
62	10	2	4	2023-05-02 00:00:00.000	2023-09-22 06:41:00.000	2023-09-22 06:41:00.000
63	10	14	4	2023-05-02 00:00:00.000	2023-09-22 06:41:00.000	2023-09-22 06:41:00.000
63	10	2	4	2023-05-02 00:00:00.000	2023-09-22 06:41:00.000	2023-09-22 06:41:00.000

Рис. 13. Вид таблицы через СУБД

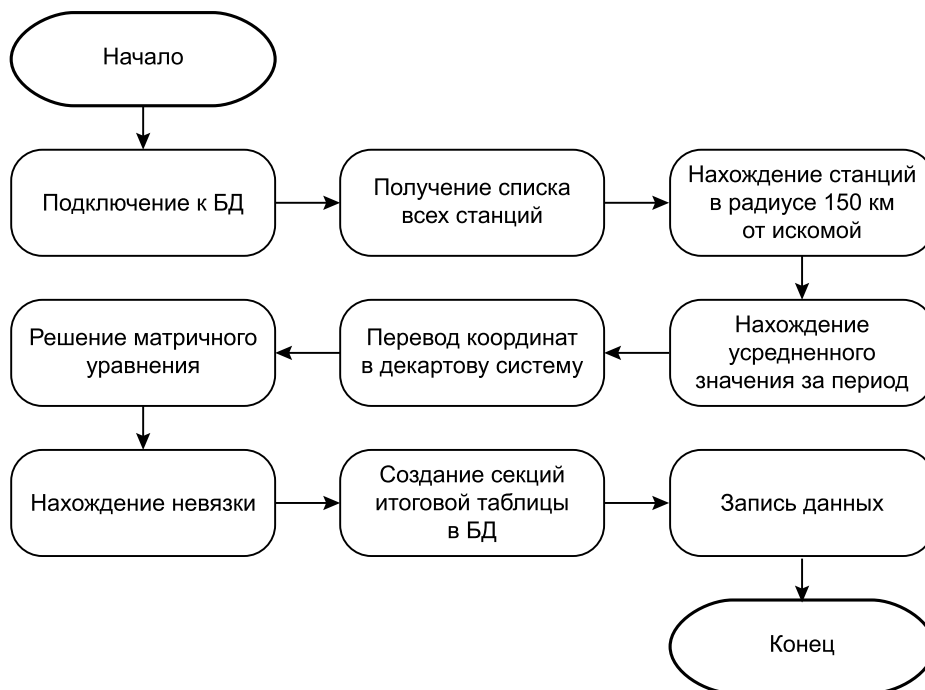


Рис. 14. Блок-схема одного цикла программы

ИРАМ. Модуль определяет время на компьютере, переводит его в UTC-Coordinated Universal Time и выдает дату. Было решено, что первого числа каждого месяца программа будет выполнять расчет по всему месяцу целиком, по трем календарным декадам и по суткам, в остальные дни выполняется расчет только суточных невязок [17].

Представить итоговые данные можно как в табличном виде (рис. 15), так и отобразив их на карте (рис. 16).

На подобной таблице прекрасно видно название станции и значение невязки. Зеленым цветом показывается допустимая

невязка, желтым — невязка слегка выходит за пределы нормы (0,5), красным цветом — серьезная невязка, выше 1 от предельно допустимого значения. Серый цвет означает отсутствие данных за период. Таблица служит для визуализации детального анализа, с помощью карты есть возможность произвести беглый анализ результатов и сделать выводы о количестве станций, нуждающихся в проверки данных.

Принцип отображения целиком идентичен таблице. У пользователя будет выбор слоев карт с определенными периодами: за месяц, сутки или декаду.

34	Ивье	
35	Имеретинка АМС	-3.05
36	Калинковичи	
37	Кепша АМС	7.84
38	Кичмай АМС	-0.35
39	Кличев	-0.18

Рис. 15. Таблица с данными невязки



Рис. 16. Макет карты по визуализации данных станций

## Выводы

В результате получилась программа, способная запускаться в любой день и полностью автоматизировать процесс нахождения важного метеорологического параметра. В интервале больше месяца программа работает довольно долго, более 10 минут, рекомендуется запускать ее чаще, чтобы интервалы были меньше. В любом случае предстоит еще процесс оптимизации. Программа имеет важное значение для метеорологов, синоптиков и климатологов, поскольку позволяет выявлять сомнительные и недостоверные данные без долгого и скрупулезного анализа данных, что ускорит их нахождение. Исключить человеческий фактор при выполнении данной задачи пока невозможно, потому что программа предоставляет данные для последующего анализа и пространственного контроля. Тем не менее исключение недостоверных данных позволит предупредить недостоверные и неоправданные прогнозы погоды, обледенение рек, гололеда и многих других явлений, критичных в судоходстве, автомобильной инфраструктуре и в других областях.

## Библиографический список

1. Kolomeets L. I., Smyshlyaev S. P. Direct and indirect effects between thunderstorm activity, temperature and atmosphere composition on a regional scale: sensitive tests with WRF-CHEM. *Proceedings of MGO*. 2016. Vol. 585. P. 187–211.
2. Бочарников Н. В., Брылев Г. Б., Кузнецова Л. И. и др. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка». СПб.: Гидрометиздат, 2007. 236 с.
3. Fabry F. *Radar Meteorology: Principles and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
4. Romps D. M., Seeley J., Vollaro D., et al. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming // *Science*. 2014. V. 346. P. 851–854.
5. Kolomeets L. I., Smyshlyaev S. P. Regional and global lightning activity effect on the composition and properties of the upper troposphere/lower stratosphere. *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*. 27. Сер. 27<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 2021. С. 1191671.
6. Гаврилова С. Ю., Иванова Т. А., Луцько Л. В. и др. О состоянии и функционировании автоматизированных метеорологической и актинометрической сетей в 2017 году. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2018. № 588. С. 86–109.
7. Бочарников Н. В., Якимайнен Н. А. Использование данных метеорологических радиолокаторов при метеообеспечении авиации. В сб.: *Труды Международной конференции по авиационной и спутниковой метеорологии*. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. С. 145–148.
8. Лялюшкин А. С. Оптимизация стратегии сканирования доплеровского метеорологического радиолокатора. В сб.: *Труды Международной конференции по авиационной и спутниковой метеорологии*. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. С. 153–158.
9. Солонин А. С. Состояние и перспективы развития автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации. В сб.: *Труды Международной конференции по авиационной и спутниковой метеорологии*. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. С. 11–14.
10. Сикарев И. А., Честнов А. И., Абрамов В. М. Аспекты разработки и дальнейшие перспективы программы автоматической обработки спутниковых архивов гидрохимических данных на языке программирования Python // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2022. № 4 (52). С. 101–109.
11. Абрамов В. М., Сикарев И. А., Честнов А. И. и др. Автоматизированная обработка архивов метеорологических данных с помощью программы на языке Python // *Речной транспорт (XXI век)*. 2022. № 4 (104). С. 53–55.

12. Честнов А. И., Сикарев И. А., Абрамов В. М. Разработка программы для автоматической обработки данных направлений ветра // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № 4 (44). С. 117–121.

13. Базлова Т. А., Бочарников Н. В., Солонин А. С. Автоматизированная система метеорологического обеспечения службы содержания автомобильных дорог // Дороги России XXI века. 2002. № 1. С. 93–95.

14. Честнов А. И., Абрамов В. М., Голосовская В. А. и др. Создание макета системы по автоматизации обработки данных в строительной климатологии для проектирования объектов речного транспорта // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 212–216.

15. Сикарев И. А., Честнов А. И., Абрамов В. М. Аспекты разработки и дальнейшие перспективы... С. 101–109.

16. Честнов А. И., Сикарев И. А., Абрамов В. М. Автоматизация процесса по нахождению выбросов

в метеорологических архивах с помощью языка программирования Python. В сб.: Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции; под ред. И. В. Зайцевой. СПб., 2023. С. 245–250.

17. Сикарев И. А., Абрамов В. М., Честнов А. И. и др. Разработка и применение программы для автоматического нахождения выбросов в метеорологических архивах // Морская радиоэлектроника. 2023. № 2 (84). С. 32–35.

Дата поступления: 15.12.2023

Решение о публикации: 28.01.2024

#### Контактная информация:

ЧЕСТНОВ Арсений Ильич — аспирант;  
arsenij430@gmail.com

## Development and application of a program for automatic finding of a discrepancy in the spatial control of regime meteorological information

A. I. Chestnov

Russian State Hydrometeorological University, 79, Voronezhskaya ul., Saint-Petersburg, 192007, Russia

**For citation:** *Chestnov A. I.* Development and application of a program for automatic finding of a discrepancy in the spatial control of regime meteorological information // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 32–46 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-32-46

### Abstract

**Objective:** to develop and apply software for automatic finding of discrepancies in automated meteorological stations in order to identify dubious and unreliable data without direct manual control in Fortran using PostgreSQL programming language queries. Write a program block for processing data from the archive of the database of meteorological stations of the unified network. Having provided a connection, with the help of requests, to ensure the receipt of data of the averaged values of ten-minute meteorological reports according to a special processing technique. Create a subroutine for solving the equation by the least squares matrix method, compare it to check the results with the linear regression method in a third-party application. Ensure proper recording of data before sending them to the database, prepare the necessary table for correct demonstration of data and user convenience in their use. Formulate correct queries to send the results of finding the discrepancy to the database. Formulate queries to create the necessary table, formulate queries and identify conditions for the implementation of the program for its more “flexible”

functioning, that is, the ability to process data and find a discrepancy in the case of non-daily operation of the program. **Methods:** the methodology is similar to the principles of recommendations for the analysis of the results of spatial monitoring of regime meteorological information of the Main Geophysical Observatory named after Voeikova A. I. Methods include the translation of coordinates into a Cartesian system and the implementation of the solution of equation systems by the least squares method. **Results:** a program has been created that can work without the participation of an operator, performing automatic startup, data processing and data recording for further storage. **Practical importance:** the program allows you to receive data quickly due to the fast processing speed without errors caused by the human factor.

**Keywords:** discrepancy, automatic processing, weather stations, Fortran programming language, PostgreSQL.

## References

1. Kolomeets L. I., Smyshlyaev S. P. Direct and indirect effects between thunderstorm activity, temperature and atmosphere composition on a regional scale: sensitive tests with WRF-CHEM. Proceedings of MGO. 2016. V. 585. P. 187–211.
2. Bocharnikov N. V., Brylev G. B., Kuznecova L. I. i dr. Avtomatizirovannye meteorologicheskie radiolokacionnye komplekсы “Meteojachejka”. SPb.: Gidrometizdat, 2007. 236 s. (In Russian)
3. Fabry F. Radar. Meteorology: Principles and Practice. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
4. Romps D. M., Seeley J., Vollaro D., Molinari J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming // Science. 2014. V. 346. P. 851–854.
5. Kolomeets L. I., Smyshlyaev S. P. Regional and global lightning activity effect on the composition and properties of the upper troposphere/lower stratosphere. Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 27. Sep. 27<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. C. 1191671.
6. Gavrilova S. Ju., Ivanova T. A., Luc’ko L. V. i dr. O sostojanii i funkcionirovanii avtomatizirovannyh meteorologicheskoy i aktinometricheskoy setej v 2017 godu. Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voejkova. 2018. № 588. S. 86–109. (In Russian)
7. Bocharnikov N. V., Jakimajnen N. A. Ispol’zovanie dannyh meteorologicheskikh radiolokatorov pri meteo-
- obespechenii aviacii. V sb.: Trudy Mezhdunarodnoj konferencii po aviacionnoj i sputnikovoj meteorologii. SPb.: Izd. RGGMU, 2008. S. 145–148. (In Russian)
8. Ljaljushkin A. S. Optimizacija strategii skanirovaniya doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora. V sb.: Trudy Mezhdunarodnoj konferencii po aviacionnoj i sputnikovoj meteorologii. SPb.: Izd. RGGMU, 2008. S. 153–158. (In Russian)
9. Solonin A. S. Sostojanie i perspektivy razvitiya avtomatizirovannyh sistem meteorologicheskogo obespechenija aviacii. V sb.: Trudy Mezhdunarodnoj konferencii po aviacionnoj i sputnikovoj meteorologii. SPb.: Izd. RGGMU, 2008. S. 11–14. (In Russian)
10. Sikarev I. A., Chestnov A. I., Abramov V. M. Aspekty razrabotki i dal’nejshie perspektivy programmy avtomaticheskoy obrabotki sputnikovyh arhivov gidrohimičeskikh dannyh na jazyke programmirovaniya Python // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp’juternye sistemy. 2022. № 4 (52). S. 101–109. (In Russian)
11. Abramov V. M., Sikarev I. A., Chestnov A. I. i dr. Avtomatizirovannaja obrabotka arhivov meteorologicheskikh dannyh s pomoshh’ju programmy na jazyke Python // Rečnoj transport (HHI vek). 2022. № 4 (104). S. 53–55. (In Russian)
12. Chestnov A. I., Sikarev I. A., Abramov V. M. Razrabotka programmy dlja avtomaticheskoy obrabotki dannyh napravlenij vetra // Informacionnye tehnologii i sistemy: upravlenie, jekonomika, transport, pravo. 2022. № 4 (44). S. 117–121. (In Russian)

13. Bazlova T. A., Bocharnikov N. V., Solonin A. S. Avtomatizirovannaja sistema meteorologičeskogo obešpečenija služby soderžanija avtomobil'nyh dorog // Dorogi Rossii HXI veka. 2002. № 1. S. 93–95. (In Russian)
14. Chestnov A. I., Abramov V. M., Golosovskaja V. A. i dr. Sozdanie maketa sistemy po avtomatizacii obrabotki dannyh v stroitel'noj klimatologii dlja proektirovanija ob'ektov rechnogo transporta // Transportnoe delo Rossii. 2022. № 2. S. 212–216. (In Russian)
15. Sikarev I. A., Chestnov A. I., Abramov V. M. Aspekty razrabotki i dal'nejšie perspektivy... S. 101–109. (In Russian)
16. Chestnov A. I., Sikarev I. A., Abramov V. M. Avtomatizacija processa po nahozhdeniju vybrosov v meteorologičeskikh arhivah s pomoshh'ju jazyka programirovanija Python. V sb.: Innovacionnye metody matematiki i fiziki v jekologičeskikh i gidrometeorologičeskikh issledovanijah. Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii. Pod redakciej I. V. Zajcevoj. SPb., 2023. S. 245–250. (In Russian)
17. Sikarev I. A., Abramov V. M., Chestnov A. I. i dr. Razrabotka i primenenie programmy dlja avtomatičeskogo nahozhdenija vybrosov v meteorologičeskikh arhivah // Morskaja radiojelektronika. 2023. № 2 (84). S. 32–35. (In Russian)

Received: 15.12.2023

Accepted: 28.01.2024

**Author's information:**

Arsenij Il. CHESTNOV — Postgraduate Student;  
arsenij430@gmail.com

---

УДК 528.236

## **Разработка методики определения параметров преобразования систем координат на основе метода нелинейного программирования первого порядка при сопровождении строительства зданий и сооружений**

**Л. А. Щенявская, Г. Г. Шевченко, П. П. Коваленко**

Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, Краснодар, Московская ул., д. 2

*Для цитирования:* Щенявская Л. А., Шевченко Г. Г., Коваленко П. П. Разработка методики определения параметров преобразования систем координат на основе метода нелинейного программирования первого порядка при геодезическом сопровождении строительства зданий и сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 47–60. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-47-60

### **Аннотация**

**Цель:** проанализировать достоинства и недостатки существующих методов нелинейного программирования для решения задач преобразования систем координат (СК). Рассмотреть вопрос о необходимости преобразования координат пунктов из местной СК в городскую. Определить возможность использования метода обобщенного приведенного градиента для преобразования координат пунктов, расположенных как на расстоянии между пунктами около 150 м, так и на расстоянии около 1,5 км. **Методы:** раскрыты теоретические основы данного метода. Представлены сведения о порядке выполнения преобразований систем координат. Приведен алгоритм метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Проведено исследование по преобразованию систем координат исходных пунктов из СК1 в СК2 с применением метода ОПГ. Обосновано требование к величине средней квадратической ошибки (СКО) положения исходных пунктов при преобразовании их из одной системы координат в другую для целей определения положения характерных точек границ земельных участков, используемых под строительство зданий и сооружений. **Результаты:** была выполнена проверка возможности применения полученных параметров преобразования для пересчета значений координат пунктов из местной СК в СК города. На основе проверки полученных параметров преобразования, была выявлена возможность их использования для пересчета координат пунктов, расположенных на расстоянии около 1,5 км. Выявлена необходимость в проведении дополнительного исследования применения метода обобщенного приведенного градиента для решения задач преобразования систем координат. **Практическая значимость:** показана необходимость преобразования систем координат в области строительства зданий и сооружений. Представлена возможность применения метода обобщенного приведенного градиента для преобразования систем координат. Использование данного метода позволит преобразовывать координаты исходных пунктов из местной системы координат в систему координат города при геодезическом сопровождении строительства зданий и сооружений различной категории.

**Ключевые слова:** преобразование систем координат, параметры преобразования, нелинейное программирование, градиентные методы, метод обобщенного приведенного градиента.

## Введение

Часто при сопровождении строительства различных зданий и сооружений, особенно при геодезическом сопровождении, встает задача выполнения преобразования систем координат. Так, например, может потребоваться решать такие задачи при работе с проектами, в которых данные представлены в разных системах координат [1], при выполнении геодезического мониторинга зданий и сооружений часто встает задача осуществить преобразование условной системы координат, в которой выполнялось наблюдение за стабильностью объекта, в систему координат объекта мониторинга [2]. Также преобразование систем координат может быть необходимым в процессе проектирования и строительства зданий и сооружений, в том числе протяженных объектов (автомобильных и железных дорог, магистральных трубопроводов), т. к. становится необходимым работать на объекте не в условной системе координат, а в принятой местной СК.

В настоящее время существует еще одна особенность, с которой сталкиваются исполнители на производстве, — необходимость преобразования координат геодезических пунктов из местной системы координат в систему координат города. Так, при выполнении топографической съемки и последующей сдачи топографического плана в департамент архитектуры материалы принимаются исключительно в системе координат города. При этом координаты пунктов, необходимые для выполнения таких работ, известны часто только в местной системе координат. В данной ситуации перед специалистом возникает задача выполнения пересчета координат пунктов. Для этого необходимо вычислить параметры преобразования. Отметим, что в настоящий момент такие параметры пре-

образования неизвестны. Так, например, нет данных о параметрах преобразования между местной системой координат Краснодарского края (МСК-23) и системой координат города Краснодара. Аналогичная ситуация в г. Сочи и г. Санкт-Петербург. Кроме этого, стоит отметить, что в строительных работах все чаще применяются технологии лазерного сканирования, результатом проведения которых является получение множества точек, представленных в различных пространственных условных системах координат [3]. В связи с этим возникает необходимость их объединения в общую систему координат и создания единого облака точек, т. е. необходимо решать задачи преобразования сканов друг относительно друга [4].

На сегодняшний день преобразование систем координат выполняется посредством линейного и нелинейного программирования. Наиболее распространенными и часто используемыми методами преобразования являются линейные методы, например параметрический способ преобразования плоских прямоугольных систем координат и способ преобразования Гельмерта [5]. Применение методов нелинейного программирования рассматривается в научной литературе довольно часто [6–8]. Однако до сих пор отсутствует единое мнение о том, какой из них является наиболее эффективным для преобразования систем координат. Методы нелинейного программирования различаются по порядку точности, требованиям к вычислению частных производных и скорости оптимизации.

Методы нелинейного программирования нулевого порядка основаны на оптимизации вычислений без необходимости определения частных производных, однако сходимость



данных методов довольно низкая, и реализация данного алгоритма работы может быть более трудоемкой нежели другие методы нелинейного программирования [9]. Методы первого порядка требуют вычисления производных целевой функции первого порядка, что позволяет более точно и быстрее, чем методы нулевого программирования, приближаться к оптимальному решению. Методы второго порядка предполагают вычисление значений производных до второго порядка включительно. Это дает еще большую точность и позволяет более эффективно и быстро находить оптимальное решение. Однако вычисление производных второго порядка может быть более сложным и требовать больше вычислительных ресурсов. Далее пойдет речь о методах первого порядка, т. к. они обладают хорошей скоростью сходимости и не требуют наличия вторых частных производных.

Методы первого порядка подразделяются на метод градиентного спуска, сопряженных градиентов, наискорейшего спуска, метод обобщенного приведенного градиента и многие другие [10, 11]. Каждый из них имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретной задачи. Важно выбирать метод, опираясь на требуемую точность оптимизации, на доступные ресурсы и сложность задачи. Комбинирование различных методов и оптимизация алгоритмов также могут привести к более эффективному решению нелинейных задач. Суть градиентных методов заключается в решении с помощью градиента задач, сводящихся к нахождению экстремумов функций. Основная идея градиентных методов заключается в том, чтобы идти в направлении наискорейшего спуска, которое задается антиградиентом ( $-\nabla f$ ). Далее в статье будет более подробно

рассмотрен метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Он не требует для своей реализации непрерывности градиента минимизируемой функции, использует способ решения задач с помощью процедуры линеаризации только ограничений, оставляя при этом целевую функцию нелинейной на всех этапах минимизации и является наиболее доступным при программной реализации различных задач [12].

### Основы метода обобщенного приведенного градиента

Метод обобщенного приведенного градиента является важным инструментом в программе *Excel* для оптимизации функций. Метод основан на процедуре линеаризации ограничений, при которой целевая функция остается нелинейной на всех этапах минимизации. В рамках данного метода используются линейно-аппроксимирующие процедуры для обработки нелинейных функций. Одной из интересных процедур, применяемых в ОПГ, является определение новых переменных, ортогональных некоторым ограничениям [13]. Это позволяет создать преобразованный базис, в котором градиент целевой функции приводится к удобному виду. Такое преобразование переменных позволяет более эффективно исследовать пространство поиска и находить оптимальные решения. В отличие от некоторых других методов оптимизации, ОПГ не требует линеаризации целевой функции. Это делает его особенно полезным для решения задач, где функция имеет сложную нелинейную структуру. ОПГ широко применяется в различных областях, таких как машинное обучение, финансовая аналитика, инженерия и другие [14]. Его гибкость и эффективность позволяют решать сложные оптимизационные задачи,

где требуется нахождение глобального минимума или максимума целевой функции. Применение линейно-аппроксимирующих процедур и создание новых переменных позволяют эффективно исследовать пространство поиска и находить оптимальные решения [15].

Метод обобщенного приведенного градиента, как и обычный метод градиентного спуска, предназначен для нахождения экстремума (максимума или минимума) функции. В отличие от обычного метода градиентного спуска, в этом методе не требуется выбирать шаг, поскольку он уже выбран в самом методе.

Алгоритм метода обобщенного градиентного спуска следующий [16]:

1. Выбираем начальную точку  $x_0$ .
2. Вычисляем  $f(x_0)$ .
3. Последовательно для  $k = 0, 1$ , необходимо выполнять шаги 4–8.
4. Вычисляем  $g_k = \nabla f(x_k)$ .
5. Находим  $\alpha_k$  из условия  $f'(\alpha_k \nabla f(x_k)) = 0$ , где  $f'$  — производная функции  $f$ .

6. Вычисляем  $x_{k+1} = x_k + \alpha_k \nabla f(x_k)$ .

7. Если необходимо, проверяем условие остановки (например, если  $|f(x_{k+1}) - f(x_k)| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданная точность).

8. В случае успешного завершения алгоритма возвращаем  $x_k$  как точку экстремума.

Рассмотрим порядок выполнения преобразования систем координат в программе *Excel* методом обобщенного приведенного градиента.

### Общие сведения о порядке выполнения преобразований систем координат на основе метода ОПГ

Выполнение преобразования систем координат предлагается осуществлять в следующей последовательности (рис. 1):

- 1) принимаем за исходные данные координаты связующих точек в системе координат СК2;
- 2) координаты связующих точек в системе координат СК1 принимаем в качестве измеренных величин;



Рис. 1. Порядок выполнения преобразования систем координат

3) задаем вес измеренным величинам  $p$  или составляем весовую матрицу  $P$  измеренных величин;

4) в качестве искомым величин принимаются значения параметров преобразования, причем значение параметров преобразования необходимо указать приближенно;

5) вычисляем значения координат связующих точек в СК2 по формулам (1) и (2):

$$x_{i_{СК2}} = x_0 + (1 + m) \cdot (x_{i_{СК1}} \cdot \cos \Theta + y_{i_{СК1}} \cdot \sin \Theta); \quad (1)$$

$$y_{i_{СК2}} = y_0 + (1 + m) \cdot (-x_{i_{СК1}} \cdot \sin \Theta + y_{i_{СК1}} \cdot \cos \Theta), \quad (2)$$

где  $x_{i_{СК2}}, y_{i_{СК2}}$  — координаты  $i$  связующих точек в системе координат СК2;

$x_0, y_0, \Theta$  и  $m$  — параметры перехода от СК1 к СК2;

$x_0, y_0$  — линейные величины, являющиеся координатами начала СК1 относительно начала СК2;

$m$  — масштабный коэффициент, учитывающий разницу в линейных масштабах;

$x_{i_{СК1}}, y_{i_{СК1}}$  — координаты  $i$  связующих точек в системе координат СК1;

$\omega$  — угол поворота осей СК1;

б) по полученным значениям уклонов координат пунктов введенных изначально и рассчитанных по формулам (1) и (2) составляем вектор поправок  $V_{СК2}$ ;

7) Задаем целевую функцию как  $f(x) = V^T P V$ , где  $V$  — вектор поправок;  $P$  — весовая матрица;

8) выполняем поиск уравненных параметров преобразования по алгоритму метода ОПГ до достижения условия  $f(x) = V^T P V = \min$ ;

9) оцениваем точность полученных параметров.

Проведем преобразование координат пунктов, расположенных на тестовом полигоне, из региональной системы координат в систему координат города.

### Преобразование систем координат исходных пунктов методом ОПГ на пунктах тестового полигона

Ниже приведен порядок действий при поиске параметров преобразования между двумя системами координат: пусть СК1 — местная система координат региона, а СК2 — система координат города. Учитывая секретность каталогов координат, первые значения координат пунктов были скрыты знаком «\*», т.к. они указывают на место расположения пунктов, и представлены в табл. 1.

Как было указано ранее, искомыми параметрами преобразования являются линейные элементы смещения систем координат относительно друг друга  $x_0, y_0$ , угловой коэффициент разворота систем координат  $\Theta$  и масштабный коэффициент  $m$ .

ТАБЛИЦА 1. Исходные координаты

Название пункта	СК2		СК1	
	$x_p, \text{М}$	$y_p, \text{М}$	$x_m, \text{М}$	$y_m, \text{М}$
Осенний	***06,747	***42,485	****58,676	****637,318
Спортивный	***92,207	***27,376	****45,202	****721,135
1008	***83,280	***88,301	****34,528	****585,940
Северный	***83,280	***88,301	****34,528	****585,940

Далее будут представлены следующие переменные:

- $x_r, y_r$  — координаты пунктов в городской системе координат;
- $x_m, y_m$  — координаты пунктов в местной системе координат;
- $x_0, y_0$  — линейные параметры преобразования;
- $\Theta$  — угловой параметр преобразования;
- $m$  — масштабный коэффициент;
- $x_{r_2}, y_{r_2}$  — вычисленные координаты пунктов в СК2 по формулам (1) и (2) примут следующий вид —  $x, y, m, v$ :

$$x_{r_2} = x_0 + \cos \Theta \cdot x_m + \sin \Theta \cdot y_m + m \cdot x_m \cdot \cos \Theta + m \cdot y_m \cdot \sin \Theta; \quad (3)$$

$$y_{r_2} = y_0 - \sin \Theta \cdot x_m + \cos \Theta \cdot y_m - m \cdot x_m \cdot \sin \Theta + m \cdot y_m \cdot \cos \Theta, \quad (4)$$

- $v_{x_i}$  и  $v_{y_i}$  — уклонения по  $x_i$  и  $y_i$  вычисляются по формулам (5) и (6) для всех пунктов:

$$v_{x_i} = (x_r - x_{r_2}) \cdot 1000, \quad (5)$$

$$v_{y_i} = (y_r - y_{r_2}) \cdot 1000. \quad (6)$$

Умножение на коэффициент 1000 в данном случае необходимо для получения значений уклонений в мм.

- вектор поправок:

$$V^T = [v_{x_1} \ v_{x_2} \ \dots \ v_{x_i} \ v_{y_1} \ v_{y_2} \ \dots \ v_{y_i}];$$

- $f(x)$  — целевая функция, вычисляемая по формуле (7):

$$f(x) = V^T P V, \quad (7)$$

где  $V$  — вектор поправок;  $P$  — весовая матрица.

Так как измерения приняты как равноточные, то весовая матрица  $P$  принимается равной единичной матрице  $E$ . Как следствие, целевая функция вычисляется как:

$$f(x) = V^T V. \quad (8)$$

Начальные значения параметров  $x_0, y_0, \Theta$  и масштабного коэффициента  $m$  задаются произвольно.

Поиск параметров выполняется на основе метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ) в *MS Excel* в следующей предложенной последовательности [2]:

1. Указываются произвольные значения искомых параметров  $x_0, y_0, \Theta, m$  равными нулю.

2. Вводятся значения координат трех известных пунктов («Осенний», «Спортивный» и «1008»).

3. Задается целевая функция в виде (8), рассчитываемая как разность между введенными (известными) значениями координат пунктов и вычисленными по формулам (3) и (4).

4. Запускается алгоритм ОПГ на линейных параметрах  $x_0, y_0$ . Запуск команды выполняется два раза с целью уточнения получаемых значений.

5. Выполняется расчет методом ОПГ четырех параметров  $x_0, y_0, \Theta, m$  одновременно, также два раза.

6. Заменяются координаты одного из исходных пунктов на координаты другого известного пункта, а именно — координаты пункта «Осенний» были заменены на координаты пункта «Северный». *Пояснение: замена координат одного пункта на другой представляет собой изменение входных данных, что дает возможность программе каждый раз работать с условно новым*

диапазоном значений. Это позволяет ей анализировать большее количество данных по области существования функции  $u$ , таким образом, уточнять искомые параметры.

7. Снова запускается алгоритм ОПГ четырех параметров  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $\Theta$ ,  $t$  одновременно.

8. Изменяется пункт, подставленный на шестом этапе на исходный, т. е. координаты пункта «Северный» на координаты пункта «Осенний».

9. Выполняется расчет методом ОПГ четырех параметрах  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $\Theta$ ,  $t$  одновременно.

В результате были подобраны параметры преобразования (табл. 2). Причем в ходе поиска решения целевая функция была минимизирована до нуля, что означает, что были найдены наилучшие параметры преобразования.

ТАБЛИЦА 2. Параметры преобразования, полученные в результате исследования

Параметр	Значение
$x_0$ , м	-446539,911
$y_0$ , м	-1364101,474
$\Theta$ , град.	-0,720
$t$	0,000

### Проверка корректности значений параметров преобразования, вычисленных на основе метода ОПГ

Для контроля выполненных вычислений решим обратную задачу с использованием координат пунктов полигонометрии, расположенных на расстоянии около 1,5 км. Для проверки используем координаты, представленные в табл. 3. Расстояния между этими пунктами представлено в табл. 4.

В таблицу *MS Excel* занесем координаты пунктов в местной системе координат, а также значения параметров преобразования, найденные ранее (табл. 2). Значения искомых координат в СК2 примем произвольно равными 0. Далее выполним поиск решения значений координат в системе СК2.

Для контроля полученных результатов сравним вычисленные значения координат пунктов с их каталожными значениями (табл. 5).

Расхождение координат пунктов, вычисленных по подобранным параметрам преобразования методом ОПГ, с их известными значениями составляет не более 2 см.

Таким образом, можно сделать вывод, что полученные ранее параметры преобразования можно использовать для пересчета

ТАБЛИЦА 3. Координаты пунктов

Название пункта	СК2		СК1	
	$x$ , м	$y$ , м	$x$ , м	$y$ , м
4122	***99,277	***44,794	****06,020	****033,450
7784	***43,189	***39,901	****66,200	****336,790
6392	***52,986	***70,925	****46,880	****183,100
173	***85,593	***60,521	****91,290	****975,720
1208	***61,151	***02,157	****54,810	****008,880

ТАБЛИЦА 4. Расстояние между пунктами

Название пунктов	Расстояние, км
«4122» – «7784»	1,45
«7784» – «6392»	1,23
«6392» – «173»	1,23
«173» – «1208»	1,17
«1208» – «4122»	1,78

координат пунктов из местной системы координат (СК1) в городскую (СК2).

Отметим, что программа выполняет поиск решения за 114 итераций, которые занимают по времени 1 минуту 10 секунд. На рис. 2 представлен график изменения целевой функции. С учетом внесения координат в таблицы и дальнейшей их замены временные затраты на вычисления составят не более 5 минут.

ТАБЛИЦА 5. Контроль результатов

№ пункта	Каталожные координаты СК2		Рассчитанные координаты СК2		Отклонение координат	
	$x_1$ , М	$y_1$ , М	$x_2$ , М	$y_2$ , М	$x_1 - x_2$ , М	$y_1 - y_2$ , М
4122	***99,277	***44,794	***99,276	***44,808	0,001	-0,014
7784	***43,189	***39,901	***43,191	***39,906	-0,002	-0,005
6392	***52,986	***70,925	***25,994	***70,929	-0,008	-0,004
173	***85,593	***60,521	***85,607	***60,531	-0,014	-0,010
1028	***61,151	***02,157	***61,162	***02,177	-0,011	-0,020
4122	***99,277	***44,794	***99,276	***44,808	0,001	-0,014



Рис. 2. График минимизации целевой функции

Тенденция сходимости алгоритма, т.е. поиска оптимального значения при минимизации целевой функции, описывается полиномом третьей степени (рис. 3).

**Обоснование требований к точности определения положения координат исходных пунктов**

При выполнении геодезических работ по определению положения характерной точки границ земельного участка, отводимого, например, под строительные работы, необходимо обеспечить точность положения такой точки  $m_p$  не более 10 см (Приказ Росреестра П/0393).

Причем, известно, что (9)

$$m_p = \sqrt{(m_{исх})^2 + (m_{изм})^2}, \tag{9}$$

где  $m_p$  — средняя квадратическая погрешность определения координат характерных точек границ земельных участков;  
 $m_{исх}$  — средняя квадратическая погрешность исходного пункта;  
 $m_{изм}$  — средняя квадратическая погрешность выполнения измерений.

Для того чтобы ошибкой исходного пункта можно было бы пренебречь, точность определения положения исходного пункта должна быть в три раза выше, чем точность выполнения измерений [17], тогда (10):

$$m_p = \sqrt{\left(\frac{1}{3}m_{изм}\right)^2 + (m_{изм})^2} = \sqrt{\frac{10}{9}m_{изм}^2} = 1,05 m_{изм} = 10 \text{ см}, \tag{10}$$

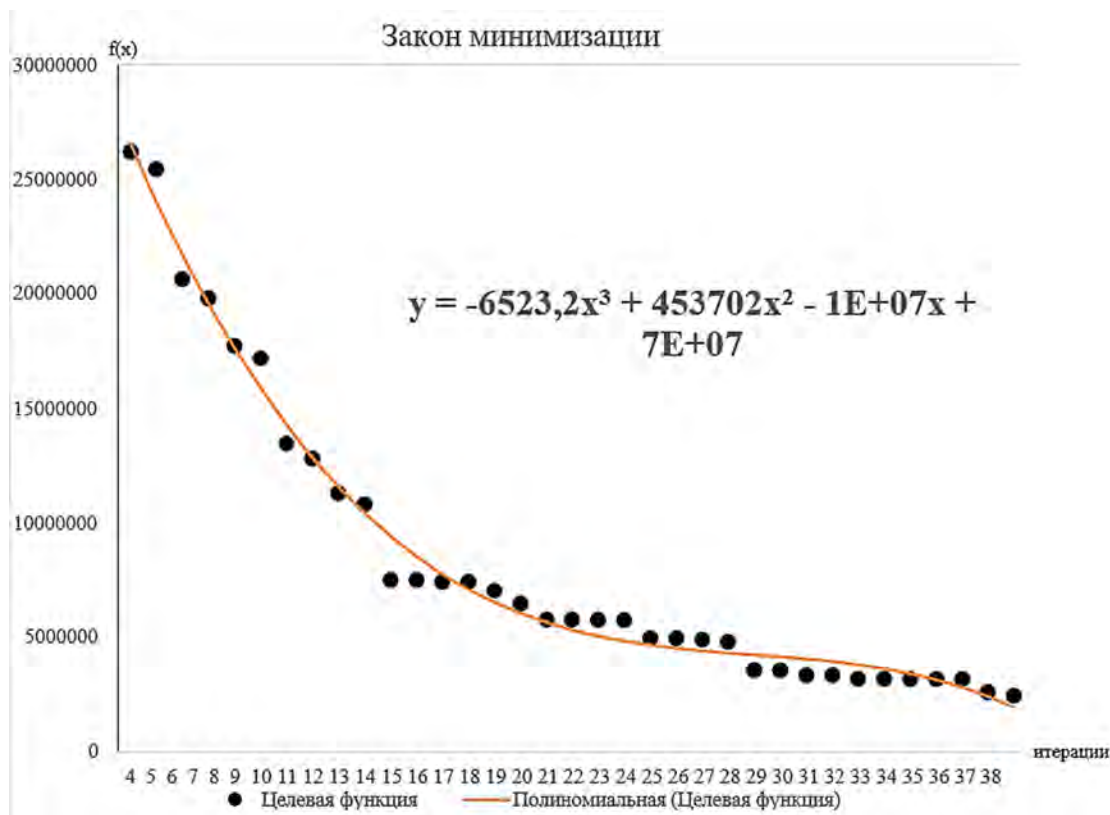


Рис. 3. Закон минимизации целевой функции

Из этого следует, что  $m_{\text{изм}} = 9,5$  см. Так как условием задано, что СКО положения исходного пункта в три раза точнее, чем СКО выполнения измерений, получим следующее значение:

$$m_{\text{исх}} = m_{\text{изм}} \div 3 = 9,5 \text{ см} \div 3 = 3,17 \text{ см.}$$

### Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты.

1. При большом объеме данных задача преобразования систем координат зачастую может решаться только итерационными методами нелинейного программирования.

2. Разработан алгоритм выполнения преобразований систем координат на основе метода обобщенного приведенного градиента, который включает в себя последовательность следующих действий: обнуление искомых параметров; ввод значений координат известных пунктов; вычисление и применение целевой функции; запуск алгоритма ОПГ на линейных параметрах; расчет методом ОПГ четырех параметров  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $\Theta$ ,  $m$  одновременно; замена координат одного из исходных пунктов на координаты другого известного пункта; повторный запуск алгоритма на четырех параметрах; изменение ранее подставленного пункта на исходный; расчет методом ОПГ четырех параметров и получение значений параметров преобразования для трансформации плоских прямоугольных систем координат.

3. Выполнен поиск параметров преобразования координат из местной СК в городскую СК. Были получены значения параметров преобразования, составляющие  $x_0 = -446539,911$ ,  $y_0 = -1364101,474$ ,  $\Theta = -0,720^\circ$ ,  $m = 0,000$ .

4. Выполнено преобразование координат пунктов полигонометрии из местной СК

в систему СК города по параметрам, найденным методом ОПГ. Расхождение расчетных значений координат от известных значений по каталогу составило не более 2 см.

5. Обоснованы требования к средней квадратической ошибке положения исходных пунктов в целях определения положения характерной точки границ земельного участка, отводимого, например, под строительные работы, которая составила  $m_{\text{исх}} = 3,17$  см.

Таким образом, метод обобщенного приведенного градиента может использоваться для цели преобразования систем координат. Он позволяет минимизировать целевую функцию, найти необходимые параметры преобразования и выполнить перевод координат из одной системы в другую с достаточной точностью. Метод обладает рядом преимуществ, одним из которых является высокая скорость нахождения решения. Однако недостатком данного метода является обязательное условие дифференцируемости функции, что не всегда можно обеспечить на практике. Таким образом, дальнейшая модификация градиентного метода на основе комбинации с другими методами нелинейного программирования, позволяющими исключить наличие данного недостатка, была бы полезной.

### Библиографический список

1. Куприянов А. О. Преобразования координат при проектировании протяженных объектов // Перспективы науки и образования. 2016. № 1 (19). С. 53–57. EDN TQJRIU.

2. Шевченко Г. Г. Разработка технологии геодезического мониторинга зданий и сооружений способом свободного стационарирования с использованием поискового метода нелинейного программирования: автореф. ... канд. техн. наук. СПб., 2020. 22 с.



3. Shevchenko G., Gura D., Moskvina P. Three-dimensional cadastre in creating an information base for a spatial model of a real estate object / E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, November, 20–22, 2019.
4. Шарафутдинова А. А. Методика проектирования и построения геодезической сети при наземном лазерном сканировании крупных промышленных объектов / А. А. Шарафутдинова, М. Я. Брынь // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2022. Т. 27, № 2. С. 72–85. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-72-85. EDN ZOVJUU.
5. Шендрик Н. К. Методика определения согласующих параметров Гельмерта для локальных территорий // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. Т. 26, № 5. С. 63–74. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-5-63-74. EDN JKUXTK.
6. Шевченко Г. Г., Брынь М. Я., Наумова Н. А. Псевдообращение матриц поисковым методом нелинейного программирования при уравнивании свободных геодезических сетей // Геодезия и картография. 2023. № 1. С. 20–28. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-991-1-20-28.
7. Елисеева Н. Н., Зубов А. В., Гусев В. Н. Применение методов поисковой оптимизации при решении геодезических задач // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64, № 5. С. 491–498. EDN RBIZAJ
8. Черкас Л. А. Оптимизация качества построения геодезических сетей методами нелинейного программирования / Л. А. Черкас, Е. В. Грищенко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. 2006. № 9. С. 117–120. EDN VKETZZ.
9. Агибалов О. И. Оптимизация многомерных задач на основе комбинирования детерминированных и стохастических алгоритмов // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 9. С. 7–11. EDN ZRRRML.
10. Шевченко Г. Г. Использование поисковых методов для уравнивания и оценки точности элементарных геодезических построений // Геодезия и картография. 2019. Т. 80, № 10. С. 10–20. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-952-10-10-20.
11. Wilke D. N. The application of gradient-only optimization methods for problems discretized using non-constant methods // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. 40 (1–6). P. 433–451.
12. Pyle L. Duane. A Simplex Algorithm — Gradient Projection Method for Nonlinear Programming. Department of Computer Science Technical Reports [Electronic resource]. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cstech/469> (date of the application: 25.05.2022).
13. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации. М.: Мир, 1972. 240 с.
14. Nesterov Yu. Gradient methods for minimizing composite functions / Mathematical Programming. 2013. 140 (1). P. 125–161.
15. Torrisi G., Grammatico S., Smith R. S., et al. A Projected Gradient and Constraint Linearization Method for Nonlinear Model Predictive Control / SIAM J. Control. Optim. 2018. P. 1968–1999.
16. Методы оптимальных решений. Нелинейное программирование. Методические указания для выполнения лабораторных работ / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: В. В. Беляев, А. В. Чиргин. СПб., 2021. 46 с.
17. Неволин А. Г. К вопросу о влиянии ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров технологического оборудования / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2019. Т. 24, № 1. С. 16–27. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-16-27. EDN GQAXYL.

Дата поступления: 23.11.2023

Решение о публикации: 20.02.2024

**Контактная информация:**

ЩЕНЯВСКАЯ Людмила Андреевна — студент,  
лаборант; Lyudmela2311@mail.ru

ШЕВЧЕНКО Гриттель Геннадьевна — канд. техн.  
наук, доцент кафедры кадастра и геоинженерии;  
grettel@yandex.ru

КОВАЛЕНКО Полина Павловна — студент;  
polinamoskvina1411@gmail.com

## **Development of a methodology for determining the parameters of the transformation of coordinate systems based on the first-order nonlinear programming method when accompanying the construction of buildings and structures**

**L. A. Shchenyavskaya, G. G. Shevchenko, P. P. Kovalenko**

Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russia

**For citation:** *Shchenyavskaya L. A., Shevchenko G. G., Kovalenko P. P.* Development of a methodology for determining the parameters of the transformation of coordinate systems based on the first-order nonlinear programming method when accompanying the construction of buildings and structures // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 47–60. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-47-60

### **Abstract**

**Objective:** to analyze the advantages and disadvantages of existing nonlinear programming methods for solving problems of coordinate system transformation (SC). To consider the need to convert the coordinates of points from local SC to urban. To determine the possibility of using the generalized reduced gradient method to transform the coordinates of points located both at a distance between points of about 150 m and at a distance of about 1.5 km. **Methods:** the theoretical foundations of this method are revealed. Information is provided on the procedure for performing transformations of coordinate systems. The algorithm of the generalized reduced gradient (OPG) method is given. A study has been conducted on the transformation of coordinate systems of starting points from SK1 to SK2 using the OPG method. The requirement for the value of the mean square error (SQR) of determining the position of the starting points when converting them from one coordinate system to another is justified. **Results:** a check was performed on the possibility of applying the obtained transformation parameters to recalculate the coordinates of points from the local SC to the city SC. Based on the verification of the obtained transformation parameters, the possibility of using them to recalculate the coordinates of points located at a distance of about 1,5 km was revealed. The need for additional research on the application of the generalized reduced gradient method to solve coordinate system transformation problems has been identified. **Practical significance:** the necessity of transformation of coordinate systems in the field of construction of buildings and structures is shown. The possibility of applying the generalized reduced gradient method to transform coordinate systems is presented. Using this method will allow you to convert the coordinates of the starting points from the local coordinate system to the coordinate system of the city with geodetic support for the construction of buildings and structures of various categories.

**Keywords:** transformation of coordinate systems, transformation parameters, nonlinear programming, gradient methods, OPG method.

## References

1. Kuprijanov A. O. Preobrazovaniya koordinat pri proektirovanii protjazhennykh ob'ektov // Perspektivy nauki i obrazovaniya. 2016. № 1 (19). S. 53–57. EDN TQJRIU. (In Russian)
2. Shevchenko G. G. Razrabotka tehnologii geodezicheskogo monitoringa zdaniy i sooruzhenij sposobom svobodnogo stacionirovaniya s ispol'zovaniem poiskovogo metoda nelinejnogo programmirovaniya: avtoref. ... kand. tehn. nauk. SPb., 2020. 22 s. (In Russian)
3. Shevchenko G., Gura D., Moskvina P. Three-dimensional cadastre in creating an information base for a spatial model of a real estate object / E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, November, 20–22, 2019.
4. Sharafutdinova A. A. Metodika proektirovaniya i postroeniya geodezicheskoy seti pri nazemnom lazernom skanirovanii krupnykh promyshlennykh ob'ektov / A. A. Sharafutdinova, M. Ja. Bryn' // Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tehnologii). 2022. T. 27, № 2. S. 72–85. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-72-85. EDN ZOVJUU. (In Russian)
5. Shendrik N. K. Metodika opredeleniya soglasujushchih parametrov Gel'merta dlja lokal'nykh territorij // Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tehnologii). 2021. T. 26, № 5. S. 63–74. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-5-63-74. EDN JKUXTK. (In Russian)
6. Shevchenko G. G., Bryn' M. Ja. Naumova N. A. Psevdoobrashhenie matric poiskovym metodom nelinejnogo programmirovaniya pri uravnavanii svobodnykh geodezicheskikh setej // Geodezija i kartografija. 2023. № 1. S. 20–28. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-991-1-0-28. (In Russian)
7. Eliseeva N. N., Zubov A. V., Gusev V. N. Prime-nenie metodov poiskovoj optimizacii pri reshenii geodezicheskikh zadach // Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. Geodezija i ajerofotos'emka. 2020. T. 64, № 5. S. 491–498. EDN: RBIZAJ. (In Russian)
8. Cherkas L. A. Optimizacija kachestva postroeniya geodezicheskikh setej metodami nelinejnogo programmirovaniya / L. A. Cherkas, E. V. Grishhenkov // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnye nauki. 2006. № 9. S. 117–120. EDN VKETZZ. (In Russian)
9. Agibalov O. I. Optimizacija mnogomernykh zadach na osnove kombinirovaniya determinirovannykh i stohasticheskikh algoritmov // Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2017. № 9. S. 7–11. EDN ZRRRML. (In Russian)
10. Shevchenko G. G. Ispol'zovanie poiskovykh metodov dlja uravnavaniya i ocenki tochnosti jelementarnykh geodezicheskikh postroenij // Geodezija i kartografija. 2019. T. 80, № 10. S. 10–20. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-952-10-10-20. (In Russian)
11. Wilke D. N. The application of gradient-only optimization methods for problems discretized using non-constant methods // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. 40 (1–6). P. 433–451.
12. Pyle L. Duane. A Simplex Algorithm — Gradient Projection Method for Nonlinear Programming. Department of Computer Science Technical Reports. [Electronic resource]. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cstech/469> (date of the application: 25.05.2022).
13. Fiakko A., Mak-Kormik G. Nelinejnoe programmirovaniye. Metody posledovatel'noj bezuslovnoj minimizacii. M.: Mir, 1972. 240 s. (In Russian)
14. Nesterov Yu. Gradient methods for minimizing composite functions / Mathematical Programming. 2013. 140(1). Rr. 125–161.
15. Torrisi G., Grammatico S., Smith R. S., et al. A Projected Gradient and Constraint Linearization Method for Nonlinear Model Predictive Control / SIAM J. Control. Optim. 2018. P. 1968–1999.
16. Metody optimal'nykh reshenij. Nelinejnoe programmirovaniye. Metodicheskie ukazaniya dlja vypol-

nenija laboratornyh rabot / Sankt-Peterburgskij gornyj universitet. Sost.: V. V. Beljaev, A. V. Chirgin. SPb., 2021. 46 s. (In Russian)

17. Nevolin A. G. K voprosu o vlijanii oshibok ishodnyh dannyh na tochnost' opredelenija geometricheskikh parametrov tehnologicheskogo oborudovaniya / A. G. Nevolin, T. M. Medvedskaja // Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tehnologij). 2019. T. 24, № 1. S. 16–27. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-16-27. EDN GQAXYL. (In Russian)

Received: 23.11.2023

Accepted: 20.02.2024

**Author's information:**

Lyudmila A. SHCHENYAVSKAYA — student,  
laboratory assistant; Lyudmela2311@mail.ru

Grittel G. SHEVCHENKO — PhD in Engineering,  
Associate Professor of the Department of Cadastre  
and Geoengineering; grettel@yandex.ru

Polina P. KOVALENKO — student;  
polinamoskvina1411@gmail.com

УДК 691.32

## Исследование стойкости бетонов анизотропной и вариатропной структур к попеременному увлажнению и высушиванию

Л. Р. Маилян<sup>1</sup>, С. А. Стельмах<sup>1</sup>, Е. М. Щербань<sup>1</sup>, А. Д. Петрушин<sup>2</sup>,  
А. Л. Маилян<sup>1</sup>, Д. М. Ельшаева<sup>2</sup>, Н. А. Щербань<sup>2</sup>, Ю. В. Жеребцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донской государственный технический университет, Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

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

**Для цитирования:** Исследование стойкости бетонов анизотропной и вариатропной структур к попеременному увлажнению и высушиванию / Маилян Л. Р., Стельмах С. А., Щербань Е. М., Петрушин А. Д., Маилян А. Л., Ельшаева Д. М., Щербань Н. А., Жеребцов Ю. В. // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 61–75. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-61-75

### Аннотация

**Цель:** исследование влияния ряда эксплуатационных факторов на итоговую стойкость вариатропного бетона к попеременным циклам увлажнения и высушивания. В данной работе обозначена проблема стойкости бетонов к циклическому увлажнению и высушиванию, а также сформулирован научный дефицит, заключающийся в неполноценности существующей базы знаний касемо взаимосвязи между типом структуры бетона и его стойкостью к циклическим воздействиям, в том числе к попеременному увлажнению и высушиванию. **Методы:** тестовые образцы изготавливались по трем разным технологиям: вибрирование, центрифугирование, виброцентрифугирование. Исследовались следующие основные характеристики: прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, водонепроницаемость. Проведенные экспериментальные исследования показали, что бетоны вариатропной структуры (центрифугирование и виброцентрифугирование) имеют более высокую стойкость к попеременному увлажнению и высушиванию, нежели бетоны анизотропной структуры (вибрирование). После 500 циклов увлажнения-высушивания и высокой степени агрессивности водной среды насыщения по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов потери прочности на сжатие и растяжение при изгибе для вибрированных бетонов составили 28,7 и 32,7% соответственно, для центрифугированных — 26,2 и 27,8% соответственно и для виброцентрифугированных — 19,6 и 21,4% соответственно. **Результаты:** виброцентрифугированные вариатропные бетоны показали наибольшую стойкость к воздействию попеременного увлажнения в водной среде с различной степенью агрессивности и высушиванию по сравнению с центрифугированными вариатропными и вибрированными анизотропными бетонами.

**Ключевые слова:** бетон, вариатропная структура, анизотропная структура, циклы увлажнения и высушивания, прочность.

## Введение

В настоящее время вопрос стойкости бетона к различным циклическим воздействиям встает все более остро в научных исследованиях и практическом строительстве. Это обусловлено разницей в условиях эксплуатации между различными строительными конструкциями, зданиями и сооружениями из бетона и железобетона [1]. Наиболее подверженными такого типа воздействиям являются конструкции зданий и сооружений, которые эксплуатируются в условиях попеременного климата с различными переходами через ноль [2]. При таких обстоятельствах научные исследования и изучение с точки зрения эксперимента и теории стойкости различных бетонов к циклическим воздействиям представляют большой интерес и являются актуальными [3, 4].

Исследования, посвященные оценке стойкости бетонов к различным видам агрессивных воздействий, представлены в работах [4–10]. Например, в работе [4] авторами была выполнена оценка коррозионной стойкости порошкового бетона, где по результатам экспериментов было установлено, что применение надсернистого аммония в качестве агрессивного раствора позволит значительно ускорить процесс испытаний цементных композитов на сульфатостойкость. Оценка стойкости железобетонных конструкций различного типа, эксплуатируемых в условиях попеременной влажности в прибрежной зоне Черного моря, выполненная в работе [5], показала, что у всех наблюдаемых конструкций было зафиксировано снижение прочности в диапазоне от 4 до 10%. В исследовании [6] авторами оценивалась коррозионная стойкость цементных композитов, модифицированных минеральной и пластифицирующей добавками, подвер-

гнутых воздействию агрессивной сульфатной среды. По итогам работы установлено, что применение данной комплексной добавки обеспечивает стабильность показателя плотности бетонов, что в дальнейшем положительно скажется на долговечности бетона. В работах [7, 8] авторами исследовались бетоны, подверженные попеременному замораживанию и оттаиванию. Применение обогащенной золы теплоэлектростанций, пластифицирующих и воздухововлекающих добавок в бетонах позволило получить бетонные композиты с улучшенной морозостойкостью и более высокой коррозионной стойкостью. Исследования стойкости бетонов, подверженных воздействию агрессивных сред во время циклов увлажнения и высушивания, проведенные в работе [9], показали, что прочность бетона на сжатие на начальном этапе при циклическом увлажнении и высушивании сначала увеличивается, а затем снижается. Что касается сульфатного воздействия, то здесь зависимость изменения прочности носит прямо пропорциональный характер, а именно с увеличением концентрации раствора сульфата натрия возрастает скорость потери прочности на сжатие. Исследование [10] имеет схожую с [9] тематику, однако отличие состоит в том, что изучались бетоны, армированные стальной фиброй. В целом изменение прочностных характеристик в зависимости от воздействия циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности среды носят аналогичный характер [9, 10].

**Целью** данной работы является исследование влияния ряда эксплуатационных факторов на итоговую стойкость вариатропного бетона к попеременным циклам увлажнения и высушивания.

**Задачами** исследования являются:

- анализ литературы, посвященной оценке влияния различных факторов на характеристики долговечности бетонов;
- разработка методики определения стойкости бетона, подвергнутого попеременному увлажнению и высушиванию, в зависимости от технологии его изготовления;
- проведение экспериментальных исследований и оценка стойкости вариатропных бетонов в сравнении с анизотропным бетоном.

**Материалы и методы.** В данном исследовании в качестве вяжущего применялся портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н (АО «Себряковцемент», Михайловка, Россия). В качестве мелкого заполнителя ис-

пользовался кварцевый песок Астаховского карьера (ООО «Кварц», Шахты, Россия). Также применялся плотный крупный заполнитель в виде щебня из песчаника фракции 10–20 мм (ООО «Донщебень», Ростов-на-Дону, Россия). Характеристики сырьевых компонентов для бетонной смеси представлены в табл. 1.

Насыщение образцов проводилось в водной среде с различной степенью агрессивности. Условия агрессивной водной среды насыщения осуществлялись путем растворения в дистиллированной воде солей сульфатов, хлоридов и нитратов ( $MgSO_4$ ,  $NaCl$ ,  $NH_4NO_3$ ). Согласно ГОСТ 31384–2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии», для бетонов с маркой по водонепроницаемости W8 слабоагрессивная

ТАБЛИЦА 1. Характеристики сырьевых компонентов для бетонной смеси

Свойство	Фактическое значение
Портландцемент марки ЦЕМ I 42.5Н	
Нормальная плотность, %	25,3
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3128
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	46,1
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток, МПа	5,6
Щебень из песчаника	
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1356
Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % по массе	5,4
Марка щебня по дробимости согласно ГОСТ 8267-93	1000
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	0,14
Песок кварцевый	
Модуль крупности	1,75
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,16
Истинная плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>	2598
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1353

среда характеризуется суммарным содержанием солей сульфатов, хлоридов и нитратов св. 50 000 до 60 000 мг/дм<sup>3</sup>, среднеагрессивная среда характеризуется содержанием солей св. 60 000 до 70 000 мг/дм<sup>3</sup>, сильноагрессивная — св. 70 000 мг/дм<sup>3</sup>.

Испытания портландцемента, песка и щебня осуществлялись по методикам ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ», ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ» и ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Составы бетонных смесей для изготовления вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонных образцов представлены в табл. 2.

Приготовление образцов осуществлялось по трем технологиям: вибрирование, центрифугирование и виброцентрифугирование. Основные этапы изготовления образцов бетона и примененное технологическое оборудование представлены в табл. 3.

Экспериментальные исследования осуществлялись с применением методов математического планирования — метод ортогонального композиционного планирования 2-го порядка Бокса – Уильсона. Всего в процессе эксперимента было изготовлено 42 образца-куба и 42 образца-призмы по технологии вибрирования и 6 образцов-цилиндров для контроля водонепроницаемости.

Для проверки водонепроницаемости центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов из бетонной смеси, предназначенной для их изготовления, также отдельно было изготовлено 6 образцов-цилиндров. Изготовление стандартных образцов-кубов и образцов-призм из центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов осуществлялось путем из распиловки. Схема выпиливания образцов из центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов представлена в исследовании [12]. Всего из центрифугированных и виброцентрифугированных элементов было выпилено 84 образца-куба и 84 образца-призмы.

Испытание образцов на воздействие переменного увлажнения и высушивания производилось с интенсивностью около 60 циклов в месяц. Ввиду отсутствия нормативных методик проведения этого испытания режим был следующий: высушивание образцов при температуре +50...+55 °С в течение 5 часов; увлажнение в воде при температуре +15...+20 °С в течение 7 часов. Температура сушки была назначена из условий разогрева бетона в естественных условиях при солнечной радиации. Продолжительность увлажнения и высушивания, установленная в результате предварительных опытов, обеспечила колебание влажности в пределах 25–75 % от величины начального водопоглощения после двухсуточного увлажнения [13, 14].

ТАБЛИЦА 2. Составы бетонных смесей

Технология изготовления	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Вода, кг/м <sup>3</sup>	Песок, кг/м <sup>3</sup>	Щебень, кг/м <sup>3</sup>
Вибрирование	375	190	725	1053
Центрифугирование	387	180	685	1147
Виброцентрифугирование				



ТАБЛИЦА 3. Этапы изготовления образцов бетона

Наименование технологического этапа	Технология изготовления (структура)	
	Вибрирование (анизотропная)	Центрифугирование и виброцентрифугирование (вариатропная)
Дозировка сырьевых компонентов	Цемент, песок, щебень и вода дозировались на весах VK-3000.1 («Масса-К», Санкт-Петербург, Россия) в соответствии с рецептурой для каждого вида бетона, представленной в табл. 2	
Приготовление бетонной смеси	Приготовление бетонной смеси осуществилось в лабораторном бетоносмесителе БЛ-10. Сначала в смеситель загружались сухие цемент и песок и перемешивались в течение 60 секунд. После этого в сухую цементно-песчаную смесь вводили воду затворения и вся эта смесь перемешивалась еще в течение 60 секунд. Далее в цементно-песчаную смесь вводили щебень и перемешивали до получения однородного состояния	
Формовка образцов	Полученная бетонная смесь заливалась в формы-кубы 2ФК-100 и формы-цилиндры ФЦ-150. Затем формы с бетонной смесью вибрировались на лабораторной виброплощадке СМЖ-739М (РНПО «РусПрибор», Санкт-Петербург, Россия) в течение 60 секунд. Далее поверхность смеси заглаживалась, выравнивалась с краями формы и помещалась в камеру нормального твердения КНТ-1 (РНПО «РусПрибор», Санкт-Петербург, Россия) на 1 сутки	Бетонная смесь загружалась в формы для центрифугирования. Затем формы для центрифугирования устанавливались на лабораторную виброцентрифугу [11]. Параметры центрифугирования были следующие: скорость вращения — 156 рад/с, продолжительность формования — 12 мин. Параметры вибрирования: высота выступов хомутов — 5 мм, длина выступов — 20 мм, шаг между выступами — 30 мм. После центрифугирования и виброцентрифугирования с форм сливался шлам и образцы в формах помещались в камеру нормального твердения КНТ-1 (РНПО «РусПрибор», Санкт-Петербург, Россия) на 1 сутки
Распалубка образцов	Через 1 сутки после формования образцы вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов извлекались из камеры нормального твердения и распалубливались	
Хранение	Хранение всех распалубленных образцов осуществлялось в камере нормального твердения в течение 28 суток	

Определение прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Методы определения прочности по контрольным образцам». Контроль водонепроницаемости бетонов осуществлялся в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

### Основная часть

Расчеты прочностных характеристик бетонов в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания, а также степени агрессивности среды производились

методом ортогонального композиционного планирования 2-го порядка с использованием программы MathCAD [15]. В качестве выходящих целевых функций экспериментальной модели были выбраны прочность кубика на сжатие ( $R$ ) и прочность на растяжение при изгибе ( $R_{ib}$ ).

В качестве входных переменных факторов, влияющих на прочностные характеристики активированных бетонов, рассматривались:

- $X_1$  — количество циклов увлажнения и высушивания от 50 до 550 циклов;
- $X_2$  — степень агрессивности жидкой среды насыщения по содержанию солей

сульфатов, хлоридов и нитратов. Уровни входных факторов и интервалы их варьирования для планирования 2-го порядка представлены в табл. 4.

Число опытов ортогонального центрального композиционного планирования 2-го порядка равно:

$$N = 2^2 + 2 \cdot 2 + 5 = 13.$$

Результаты определения прочностных характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов представлены в табл. 5–8.

Согласно результатам испытаний образцов бетона, изготовленных по трем различным технологиям, виброцентрифугированные бетоны имеют наиболее высокие прочностные характеристики. Также все бетоны соответствуют требованиям по водонепроницаемости и имеют марку W8.

По результатам расчета коэффициентов и проверки значимости данных коэффициентов по критерию Стьюдента ( $t_{\alpha}$ , ( $f_2$ )) были получены следующие регрессионные уравнения:

– для вибрированных бетонов:

$$R = 35,69 - 3,18X_1 - 0,67X_2 - 1,45X_1X_2 - 0,03X_1^2 + 1,15X_2^2$$

$$R_{fb} = 4,26 - 0,44X_1 - 0,11X_2 - 0,2X_1X_2 - 0,01X_1^2 + 0,11X_2^2$$

– для центрифугированных бетонов:

$$R = 43,07 - 3,23X_1 - 0,82X_2 - 2,1X_1X_2 - 0,26X_1^2 + 1,02X_2^2$$

$$R_{fb} = 5,04 - 0,44X_1 - 0,11X_2 - 0,25X_1X_2 - 0,01X_1^2 + 0,11X_2^2$$

– для виброцентрифугированных:

$$R = 49,93 - 3,07X_1 - 0,38X_2 - 1,78X_1X_2 - 0,59X_1^2 + 0,88X_2^2$$

$$R_{fb} = 5,8 - 0,37X_1 - 0,07X_2 - 0,25X_1X_2 - 0,08X_1^2 + 0,12X_2^2$$

ТАБЛИЦА 4. Уровни входных факторов и интервалы их варьирования для планирования 2-го порядка

Входные факторы	Уровень варьирования					Интервал варьирования, δ
	-1,414	-1	0	1	1,414	
$X_1$	50	200	350	500	550	50 и 150
$X_2$	50 000	55 000	65 000	75 000	80 000	5000 и 10 000

ТАБЛИЦА 5. Результаты определения физико-механических характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов контрольного состава

Вид бетона	$R$ , МПа	$R_{fb}$ , МПа	Водонепроницаемость образцов, МПа
Вибрированный	42,8	5,2	0,8
Центрифугированный	48,9	5,8	0,9
Виброцентрифугированный	54,6	6,4	

ТАБЛИЦА 6. Результаты определения характеристик вибрированных бетонов

№ п/п	В виде переменных		R, МПа	R <sub>тв</sub> , МПа
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>		
1	1	1	30,5	3,5
2	-1	1	40,1	4,8
3	1	-1	36,8	4,4
4	-1	-1	40,6	4,9
5	1,414	0	31,2	3,6
6	-1,414	0	39,7	4,8
7	0	1,414	38,3	4,5
8	0	-1,414	37,3	4,4
9	0	0	35,4	4,2
10	0	0	36,1	4,4
11	0	0	35,0	4,1
12	0	0	36,7	4,4
13	0	0	35,2	4,2

ТАБЛИЦА 7. Результаты определения характеристик центрифугированных бетонов

№ п/п	В виде переменных		R, МПа	R <sub>тв</sub> , МПа
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>		
1	1	1	36,1	4,2
2	-1	1	47,3	5,6
3	1	-1	44,5	5,2
4	-1	-1	47,3	5,6
5	1,414	0	38,4	4,4
6	-1,414	0	46,8	5,6
7	0	1,414	45,8	5,3
8	0	-1,414	44,5	5,2
9	0	0	41,9	4,9
10	0	0	43,8	5,2
11	0	0	42,6	4,9
12	0	0	44,1	5,2
13	0	0	42,9	5,0

ТАБЛИЦА 8. Результаты определения характеристик виброцентрифугированных бетонов

№ п/п	В виде переменных		R, МПа	R <sub>тв</sub> , МПа
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>		
1	1	1	43,9	5,0
2	-1	1	53,5	6,2
3	1	-1	50,6	6,0
4	-1	-1	53,1	6,2
5	1,414	0	44,3	5,1
6	-1,414	0	53,1	6,2
7	0	1,414	52,8	6,2
8	0	-1,414	50,5	5,9
9	0	0	48,9	5,7
10	0	0	50,5	5,9
11	0	0	49,6	5,7
12	0	0	51,1	5,9
13	0	0	49,5	5,8

Проверка адекватности уравнений регрессии проводилась по критерию Фишера и показала, что все полученные модели уравнений адекватны.

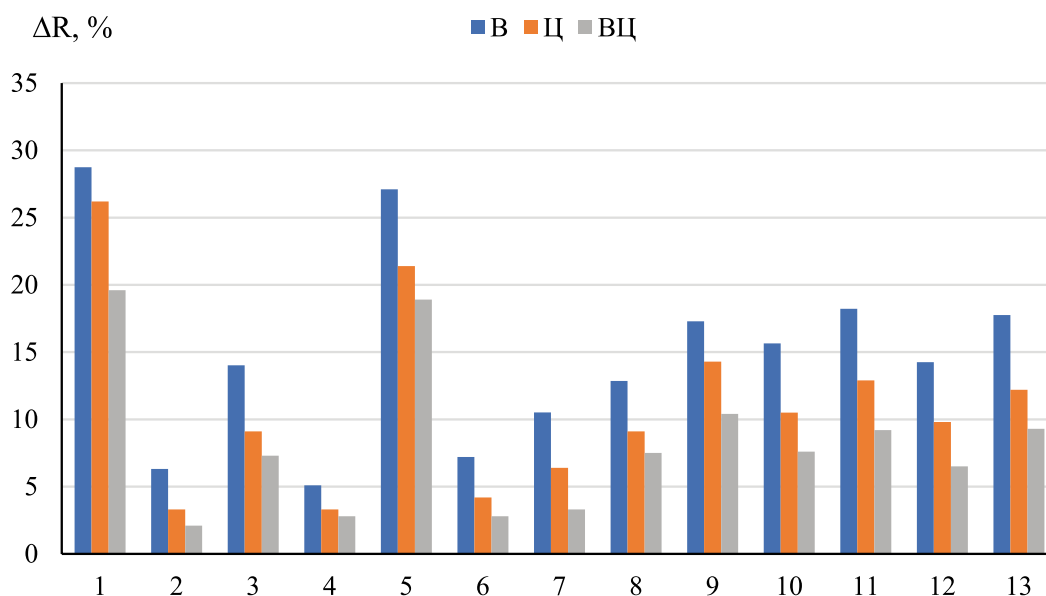
Изменения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе в графическом виде представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют изменения прочностных характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности водной среды. Наибольшие снижения прочностных характеристик зафиксированы у вибрированных бетонов. Центрифугированные бетоны имеют меньшие проценты снижения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе, нежели вибрированные, а наименьшие потери прочностных характеристик зафиксированы у виброцентрифугированных бетонов.

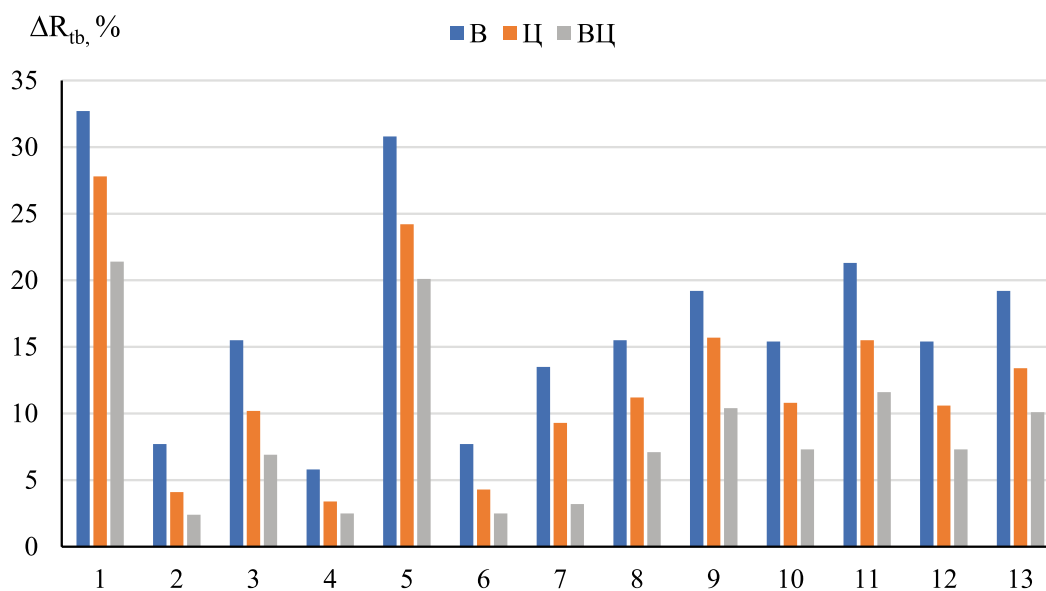
Анализируя влияние рассмотренных факторов, можно заключить, что наибольший процент снижения прочности для всех видов бетонов наблюдается при количестве циклов увлажнения и высушивания, равном 500, и высокой степени агрессивности водной среды насыщения по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов. Так, у вибрированных бетонов потеря прочности на сжатие составила 28,7 и 32,7% для прочности на растяжение при изгибе, у центрифугированных — 26,2 и 27,8%, а у виброцентрифугированных — 19,6 и 21,4% соответственно. Наименьший же процент снижения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе наблюдался для всех видов бетонов при количестве циклов увлажнения и высушивания, равном 200, и низкой степени агрессивности во-

дной среды насыщения по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов. У вибрированных бетонов потери прочности на сжатие составили 5,1 и 5,8% для прочности на растяжение при изгибе, у центрифугированных — 3,3 и 3,4%, а у виброцентрифугированных — 2,8 и 2,5% соответственно. Что же касается исследований, проведенных при значениях факторов, где количество циклов увлажнения и высушивания равнялось 350, а водная среда насыщения имела среднюю степень агрессивности, то здесь средние потери прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе для вибрированных бетонов составили 16,6 и 18,1%, для центрифугированных — 11,9 и 13,2% и для виброцентрифугированных бетонов — 8,6 и 9,3% соответственно.

Наибольшая стойкость виброцентрифугированных и центрифугированных вариатропных бетонов по сравнению с вибрированными анизотропными бетонами, выраженная в меньших потерях прочностных характеристик при равных факторах агрессивного воздействия, в первую очередь объясняется наиболее плотным внешним слоем у бетонов, полученных по технологии центробежного уплотнения [16–18]. Рассмотренные особенности изменения механических свойств бетона в процессе попеременного увлажнения и высушивания по принятой методике следует объяснить тем, что при циклической миграции влаги происходят перенос и отложение новообразований на стенках пор и капилляров, что приводит к их сужению и снижению вследствие этой проницаемости бетона, что изначально может благоприятно сказываться на его стойкости. Однако дальнейшее снижение прочности происходит вследствие нарушения сцепления цементного камня с заполнителем. Как известно, зона



**Рис. 1.** Изменения прочности на сжатие вибрированных (В), центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности водной среды



**Рис. 2.** Изменения прочности на растяжение при изгибе вибрированных (В), центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) бетонов в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания и степени агрессивности водной среды

контакта является основным путем проникновения и миграции влаги в бетоне [19, 20]. В дальнейшем в соответствии с [21] происходит растворение связей между цементным камнем и заполнителем, а также снижение прочности их взаимного сцепления. Таким образом, можно считать, что одной из основных причин снижения прочности бетона в процессе циклического увлажнения и высушивания является нарушение прочной связи цементного камня с заполнителем. При этом развитие микро- и макротрещин происходит при высыхании.

При увлажнении нагретого бетона чередование циклов подобно удару, который вызывает напряжения меняющегося знака, приводящие к появлению микротрещин, а затем к их развитию. Накопление таких нарушений сопровождается увеличением внешнего объема и пористости, уменьшением прочности, а также изменением других физико-механических свойств материала. Соответственно, чередующиеся воздействия увлажнения и высушивания приводят к потере эксплуатационных свойств материала конструкций или элементов инженерных сооружений.

## Выводы

По результатам оценки влияния попеременного увлажнения и высушивания, а также степени агрессивности водной среды насыщения на бетоны, которые изготовлены по различным технологиям (вибрирования, центрифугирования и виброцентрифугирования) и имеют различную структуру (анизотропную и вариатропную), можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением числа циклов увлажнения и высушивания прочность на сжатие

и на растяжение при изгибе для всех видов бетонов уменьшается.

2. Наибольшие падения прочности на сжатие и на растяжение при изгибе для всех видов бетонов зафиксированы там, где водная среда насыщения имела высокий уровень агрессии по содержанию солей сульфатов, хлоридов и нитратов.

3. Виброцентрифугированные вариатропные бетоны показали наибольшую стойкость к воздействию попеременного увлажнения в водной среде с различной степенью агрессивности и высушивания по сравнению с центрифугированными вариатропными и вибрированными анизотропными бетонами. Потери прочностей после 500 циклов у виброцентрифугированных вариатропных бетонов составили от 19 до 22 %, что на 6–7 % меньше, чем у центрифугированных вариатропных бетонов, и на 9–12 % меньше, чем у вибрированных анизотропных бетонов.

Таким образом, в ходе проведения исследования ликвидирован определенный научный дефицит в отношении взаимосвязи между типом структуры бетона, варьируемой технологией изготовления, и его стойкостью к попеременному увлажнению и высушиванию. Направление развития исследования лежит в проведении масштабных экспериментов с переходом к натурным исследованиям в реальных конструкциях. Практическая перспектива применения полученных результатов заключается в получении опытной базы данных для районов строительства, характеризующихся попеременным увлажнением и высушиванием, и различным уровнем агрессивности водной среды насыщения реальных строительных конструкций зданий и сооружений из бетона и железобетона.

**Библиографический список**

1. Леонович С. Н., Зикеев Л. Н. Долговечность центрифугированных железобетонных стоек. Обзорная информация. М.: Информэнерго, 1991. 64 с.
2. Низина Т. А., Низин Д. Р., Селяев В. П. и др. Большие данные при прогнозировании климатической стойкости строительных материалов. I. Температура и влажность воздуха // Строительные материалы и изделия. 2023. Т. 6, № 3. С. 18–30. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-3-18-30.
3. Толстой А. Д., Лесовик В. С., Новиков К. Ю. и др. Коррозионная стойкость изделий из порошкового бетона // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 11. С. 43–46.
4. Сергушина Е. С., Ерофеев В. Т., Кабанов О. В. и др. Стойкости тяжелых бетонов в условиях переменной влажности // Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: сб. научных трудов. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2022. С. 126–141.
5. Терешкин И. П. Исследование коррозионной стойкости модифицированных бетонных композитов в сульфатных средах // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8036](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8036)
6. Петрик И. Ю., Зайченко Н. М., Зайченко В. М. и др. Морозостойкость и коррозионная стойкость тяжелого бетона с повышенным содержанием обогащенной золы ТЭС // Современное промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 225–234.
7. Корсун А. М., Батыновский Э. И. Морозостойкость цементного бетона во взаимосвязи с искусственно создаваемой пористостью // Проблемы современного бетона и железобетона. 2018. № 10. С. 169–184.
8. Li L., Shi J., Kou J. Experimental Study on Mechanical Properties of High-Ductility Concrete against Combined Sulfate Attack and Dry-Wet Cycles // *Materials*. 2021. No. 14. 4035. DOI: 10.3390/ma14144035.
9. Liu J., Zang S., Yang F., et al. Fracture Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete under Dry-Wet Cycle Sulfate Attack // *Buildings*. 2022. No. 12. 1623. DOI: 10.3390/buildings12101623.
10. Marcos-Meson V., Fischer G., Solgaard A., et al. Mechanical Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed to Wet-Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide // *Materials*. 2021. No. 14. 2642. DOI: 10.3390/ma14102642.
11. Стельмах С. А., Холодняк М. Г., Щербань Е. М. и др. Устройство для изготовления изделий из виброцентрифугированного бетона // Пат. на изобретение 197610, Россия, МПК В28В 21/30, ДГТУ. № 2020103753; заявл. 29.01.2020; опубл. 18.05.2020, Бюл. № 14. 4 с.
12. Маилян Л. Р., Виноградова Е. В., Ельшаева Д. М. и др. Исследование интегральных прочностных и деформативных характеристик центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов на активированном портландцементе // *Строительство и архитектура*. 2021. № 3. С. 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-46-50 (дата обращения: 07.12.2023).
13. Невский В. А., Юндин А. Н., Кончичев М. П. и др. Долговечность железобетонных лотков и пути ее повышения // *Гидротехника и мелиорация*. 1971. № 2. С. 57–64.
14. Shcherban' E. M., Stel'makh S. A., Beskopylny A. N., et al. The Influence of Recipe-Technological Factors on the Resistance to Chloride Attack of Variotropic and Conventional Concrete // *Infrastructures*. 2023. No. 8. 108. DOI: 10.3390/infrastructures8070108.
15. Лесниченко Е. Н., Чернышева Н. В., Дребезгова М. Ю. и др. Разработка многокомпонентного гипсоцементного вяжущего с применением метода математического планирования эксперимента // *Строительные материалы и изделия*. 2022.

Т. 5, № 2. С. 5–12. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-5-12.

16. Poursae A., Ross B. The Role of Cracks in Chloride-Induced Corrosion of Carbon Steel in Concrete-Review // *Corros. Mater. Degrad.* 2022. No. 3. 258–269. DOI: 10.3390/cmd3020015

17. Beskopylny A. N., Shcherban E. M., Stel'makh S. A., et al. Influence of Variatropy on the Evaluation of Strength Properties and Structure Formation of Concrete under Freeze-Thaw Cycles // *J. Compos. Sci.* 2023. No. 7. 58. DOI: 10.3390/jcs7020058.

18. Ахвердов И. Н. Вопросы теории центробежного формования и уплотнения бетонной смеси. Республиканское научно-техническое совещание: Технология формования железобетонных изделий. 1979. С. 3–12.

19. Трофимов Б. Я., Шудьяков К. В., Махмудов А. М. Влияние на долговечность бетона на микроструктуры гидратных фаз цементного камня // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.* 2021. № 3. С. 8–18.

20. Москвин В. М., Иванов Ф. М., Алексеев С. Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1960. С. 536.

21. Клюев А. В., Кашапов Н. Ф., Клюев С. В. и др. Экспериментальные исследования процессов

структурообразования композиционных смесей с техногенным механоактивированным кремнеземистым компонентом // *Строительные материалы и изделия.* 2023. Т. 6, № 2. С. 5–18. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18.

Дата поступления: 08.12.2023

Решение о публикации: 14.02.2024

#### **Контактная информация:**

МАИЛЯН Левон Рафаэлович — докт. техн. наук, профессор; lrm@aanet.ru

СТЕЛЬМАХ Сергей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; sergej.stelmax@mail.ru

ЩЕРБАНЬ Евгений Михайлович — канд. техн. наук, доцент; au-geen@mail.ru

ПЕТРУШИН Александр Дмитриевич — докт. техн. наук, профессор; eps@rgups.ru

МАИЛЯН Александр Леонович — докт. техн. наук, профессор; mailyan\_a@sroufo.ru

ЕЛЬШАЕВА Диана Михайловна — аспирант; diana.elshaeva@yandex.ru

ЩЕРБАНЬ Наталья Александровна — аспирант; natalya\_1998\_dotsenko@mail.ru

ЖЕРЕБЦОВ Юрий Владимирович — аспирант; yuri.zherebtsov@gmail.com



## Study of the resistance of concrete of anisotropic and varitropic structures to alternating wetting and drying

L. R. Mailyan<sup>1</sup>, S. A. Stel'makh<sup>1</sup>, E. M. Shcherban'<sup>1</sup>, A. D. Petrushin<sup>2</sup>,  
A. L. Mailyan<sup>1</sup>, D. M. El'shaeva<sup>2</sup>, N. A. Shcherban'<sup>2</sup>, Yu. V. Zherebtsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Don State Technical University, 1, sq. Gagarina, Rostov-on-Don, 344000, Russia

<sup>2</sup> Rostov State Transport University, 2, sq. Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostov-on-Don, 344038, Russia

**For citation:** Study of the durability of concrete anisotropic and variatropic structures to alternate moistening and drying / Mailyan L. R., Stel'makh S. A., Shcherban' E. M., Petrushin A. D., Mailyan A. L., El'shaeva D. M., Shcherban' N. A., Zherebtsov Yu. V. // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 61–75 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-61-75.

### Abstract

**Objective:** study of the influence of a number of operational factors on the final resistance of varitropic concrete to alternating cycles of wetting and drying. This work identifies the problem of concrete resistance to cyclic wetting and drying, and also formulates a scientific deficiency consisting in the inadequacy of the existing knowledge base regarding the relationship between the type of concrete structure and its resistance to cyclic influences, including alternating wetting and drying. **Methods:** test samples were made using three different technologies: vibration, centrifugation, and vibration centrifugation. The following main characteristics were studied: compressive strength, tensile strength in bending, water resistance. Experimental studies have shown that concretes with a varitropic structure (centrifugation and vibration centrifugation) have higher resistance to alternating wetting and drying than concretes with an anisotropic structure (vibration). After 500 cycles of wetting-drying and a high degree of aggressiveness of the saturated aqueous environment in terms of the content of sulfate, chloride and nitrate salts, the loss of compressive and tensile strength in bending for vibrated concrete was 28.7 and 32.7 respectively, for centrifuged concrete — 26.2 and 27.8%, respectively, and for vibrocentrifuged ones — 19.6 and 21.4 %, respectively. **Results:** Vibrocentrifuged varitropic concretes showed the greatest resistance to the effects of alternating wetting in an aqueous environment with varying degrees of aggressiveness and drying compared to centrifuged varitropic and vibrated anisotropic concretes.

**Keywords:** concrete, variatropic structure, anisotropic structure, wetting and drying cycles, strength.

### References

1. Leonovich S. N., Zikeev L. N. Dolgovechnost' centrifugirovannykh zhelezobetonnykh stoek. Obzornaya informatsiya. M.: Informenergo, 1991. 64 s. (In Russian)
2. Nizina T. A., Nizin D. R., Selyaev V. P. i dr. Bol'shie dannye pri prognozirovanii klimaticheskoy stojkosti stroitel'nykh materialov. I. Temperatura i vlazhnost' vozduha // Stroitel'nye materialy i izdeliya. 2023. T. 6, no. 3. S. 18–30. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-3-18-30. (In Russian)
3. Tolstoj A. D., Lesovik V. S., Novikov K. Yu., et. al. Korrozionnaya stojkost' izdelij iz poroshkovogo betona // Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova. 2016. no. 11. S. 43–46. (In Russian)
4. Sergushina E. S., Erofeev V. T., Kabanov O. V., et. al. Stojkosti tyazhelykh betonov v usloviyah peremennoj vlazhnosti // Vestnik Privolzhskogo territorial'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nykh nauk: sb. nauchnykh trudov. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. 2022. S. 126–141. (In Russian)
5. Tereshkin I. P. Issledovanie korrozionnoj stojkosti modifitsirovannykh betonnykh kompozitov v sul'fatnykh sredah // Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. No. 11.

URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8036](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8036)  
(In Russian)

6. Petrik I. Yu., Zajchenko N. M., Zajchenko V. M., et al. Morozostojkost' i korrozionnaya stojkost' tyazhelogo betona s povyshennym sodержaniem obogashchennoj zoly TES // *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2021. No. 4. S. 225–234. (In Russian)

7. Korsun A. M., Batyanovskij E. I. Morozostojkost' cementnogo betona vo vzaimosvyazi s iskusstvenno sozdavaemoj poristost'yu // *Problemy sovremenno-go betona i zhelezobetona*. 2018. No. 10. S. 169–184. (In Russian)

8. Li L., Shi J., Kou J. Experimental Study on Mechanical Properties of High-Ductility Concrete against Combined Sulfate Attack and Dry-Wet Cycles. *Materials*. 2021. No. 14. 4035. DOI: 10.3390/ma14144035.

9. Liu J., Zang S., Yang F., et al. Fracture Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete under Dry-Wet Cycle Sulfate Attack. *Buildings*. 2022. No. 12. 1623. DOI: 10.3390/buildings12101623.

10. Marcos-Meson V., Fischer G., Solgaard A., et al. Mechanical Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Exposed to Wet-Dry Cycles of Chlorides and Carbon Dioxide. *Materials*. 2021. No. 14. 2642. DOI: 10.3390/ma14102642.

11. Stel'mah S. A., Holodnyak M. G., Shcherban' E. M., et al. Ustrojstvo dlya izgotovleniya izdelij iz vibrocentrifugirovannogo betona // *Pat. na izobretenie 197610, Rossiya, MPK B28B 21/30, DGTU. № 2020103753; zayavl. 29.01.2020; opubl. 18.05.2020, Byul. No. 14. 4 s.* (In Russian)

12. Mailyan L. R., Vinogradova E. V., El'shaeva D. M. i dr. Issledovanie integral'nyh prochnostnyh i deformativnyh harakteristik centrifugirovannyh i vibrocentrifugirovannyh betonov na aktivirovannom portlandcemente // *Stroitel'stvo i arhitektura*. 2021. No. 3. S. 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-46-50 (data obrashcheniya: 07.12.2023). (In Russian)

13. Nevskij V. A., Yundin A. N., Konchichev M. P., et al. Dolgovechnost' zhelezobetonyh lotkov i puti ee povysheniya // *Gidrotehnika i melioraciya*. 1971. No. 2. S. 57–64. (In Russian)

14. Shcherban' E. M., Stel'makh S. A., Beskopylny A. N., et al. The Influence of Recipe-Technological Factors on the Resistance to Chloride Attack of Variotropic and Conventional Concrete. *Infrastructures*. 2023. No. 8. 108. DOI: 10.3390/infrastructures8070108.

15. Lesnichenko E. N., Chernysheva N. V., Drezbegova M. Yu., et al. Razrabotka mnogokomponentnogo gipsocementnogo vyazhushchego s primeneniem metoda matematicheskogo planirovaniya eksperimenta // *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2022. T. 5, no. 2. S. 5–12. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-2-5-12. (In Russian)

16. Poursaei A., Ross B. The Role of Cracks in Chloride-Induced Corrosion of Carbon Steel in Concrete-Review. *Corros. Mater. Degrad.* 2022. No. 3. P. 258–269. DOI: 10.3390/cmd3020015.

17. Beskopylny A. N., Shcherban' E. M., Stel'makh S. A., et al. Influence of Variatropy on the Evaluation of Strength Properties and Structure Formation of Concrete under Freeze-Thaw Cycles. *J. Compos. Sci.* 2023. No. 7. 58. DOI: 10.3390/jcs7020058.

18. Ahverdov I. N. Voprosy teorii centrobezhnogo formovaniya i uplotneniya betonnoj smesi. *Respublikanskoe nauchno-tehnicheskoe soveshchanie: Tekhnologiya formovaniya zhelezobetonyh izdelij*. 1979. S. 3–12. (In Russian)

19. Trofimov B. Ya., Shuldyakov K. V., Mahmudov A. M. Vliyanie na dolgovechnost' betona mikrostruktury gidratnyh faz cementnogo kamnya // *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*. 2021. No. 3. S. 8–18. (In Russian)

20. Moskvina V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. N., et al. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashchity. M.: Strojizdat, 1960. S. 536. (In Russian)

21. Klyuev A. V., Kashapov N. F., Klyuev S. V., et al. Eksperimental'nye issledovaniya processov strukturoobrazovaniya kompozitsionnyh smesey s tekhn.

nogennym mekhanoaktivirovannym kremnezemistym komponentom // Stroitel'nye materialy i izdeliya. 2023. T. 6, no. 2. S. 5–18. (In Russian)

Received: 08.12.2023

Accepted: 14.02.2024

**Author's information:**

Levon R. MAILYAN — Grand PhD in Engineering, Professor; lrm@aaanet.ru

Sergei A. STEL'MAKH — PhD in Engineering, Associate Professor; sergej.stelmax@mail.ru

Evgenii M. SHCHERBAN' — PhD in Engineering, Associate Professor; au-geen@mail.ru

Aleksandr D. PETRUSHIN — Grand PhD in Engineering, Professor; eps@rgups.ru

Aleksandr L. MAILYAN — Grand PhD in Engineering, Professor; mailyan\_a@sroufo.ru

Diana M. EL'SHAEVA — Postgraduate Student; diana.elshaeva@yandex.ru

Natal'ya A. SHCHERBAN' — Postgraduate Student; natalya\_1998\_dotsenko@mail.ru

Yurii V. ZHEREBTSOV — Postgraduate Student, yuri.zherebtsov@gmail.com

УДК 629.067

## Проблемы безопасности при эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств

Ю. Н. Канонин

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

**Для цитирования:** Канонин Ю. Н. Проблемы безопасности при эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 76–84. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-76-84

### Аннотация

**Цель:** анализ систем управления, эксплуатируемых в настоящее время в России и за рубежом высокоавтоматизированных транспортных средств, опасностей и проблем, возникающих при эксплуатации ВАТС. **Методы:** поиск и анализ информации о существующих ВАТС на предмет существующих проблем и возможных вариантах их решения. **Практическая значимость:** проведен анализ вариантов применения высокоавтоматизированных транспортных средств, показаны проблемы при их эксплуатации и возможные варианты решения проблем.

**Ключевые слова:** высокоавтоматизированные транспортные средства (ВАТС), беспилотный транспортный коридор, преимущества и недостатки ВАТС.

Считается, что первый автопилот в мире был продемонстрирован в 1914 году американцем Л. Сперри. Устройство позволяло автоматически удерживать курс и стабилизацию крена самолета. Для этого руль высоты и руль направления соединялись гидравлическим приводом с блоком, связанным, в свою очередь, с гирокомпасом и высотомером [1].

На железнодорожном транспорте (метрополитене) система автоведения поезда метрополитена (САВПМ) впервые была применена в 1967 году на линии Виктория в Лондоне и сегодня на многих железнодорожных линиях человека заменила автоматика. Так различают системы автоведения пригородных электропоездов (САВЭП), пассажирских (САВПП) и грузовых (САВГП) поездов, к каждой из которых предъявляют свои требования [2].

И если у самолета в воздухе вероятность встретиться с другим летательным аппаратом мала, а рельсы облегчают применение систем автоматического управления, то на автомобильных дорогах общего пользования при использовании таких систем все гораздо сложнее.

Устройства, позволяющие поддерживать определенную скорость движения автомобиля, появились в США в 40-х годах прошлого века. С этого времени устройства автоматического управления автомобилями постоянно совершенствуются и в настоящее время все чаще применяются на автомобилях в мире и в России.

С 1 декабря 2018 года на основании [3] в Москве и Республике Татарстан начался эксперимент по опытной эксплуатации на дорогах общего пользования высокоав-

томатизированных транспортных средств (ВАТС), с 1 марта 2020 года распространившийся на Владимирскую, Ленинградскую, Московскую, Нижегородскую, Новгородскую и Самарскую области, Чувашскую Республику, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономный округ, Краснодарский край и г. Санкт-Петербург. Одной из задач данного эксперимента является подтверждение возможности эксплуатации ВАТС на автомобильных дорогах общего пользования в автоматизированном режиме управления. Среди документов, необходимых для участия в эксперименте, участником в обязательном порядке подавалась специальная декларация о безопасности ВАТС, которые не могут быть оценены на соответствие обязательным требованиям, установленным техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011) [4, 5], в которой участником эксперимента заявлялось, что ВАТС является безопасным для участия в дорожном движении в режиме опытной эксплуатации по дорогам общего пользования.

В документе также прописывались требования к водителю и оснащению ВАТС. В частности, указывалось, что в ВАТС должно быть устройство для активации и деактивации автоматизированной системы вождения, доступ к которому обеспечивается для водителя без отсоединения ремней безопасности. То есть на протяжении всего эксперимента машина ни на секунду не должна была оставаться без контроля оператора (водителя). Предполагается, что эксперимент будет закончен в 2024 году, в нем примут участие 38 регионов, а из требований к управлению ВАТС будет исключен пункт по обязательному нахождению водителя в кабине [6].

В рамках эксперимента в октябре 2022 года Постановлением Правительства РФ [7] на скоростной трассе М11 «Нева» была предусмотрена организация беспилотного транспортного коридора между логистическими терминалами, расположенными рядом с Москвой и Санкт-Петербургом. Такой же транспортный коридор предусматривается на трассе М-12 (Москва – Казань – Екатеринбург). Ожидается увеличение сферы деятельности ВАТС и количества регионов, задействованных в эксперименте. Какие же преимущества в сфере обеспечения безопасности людей имеет более широкое применение ВАТС?

В рамках эксперимента предусматривается эксплуатация ВАТС вплоть до 5-го уровня по системе SAE J3016 международного сообщества автомобильных инженеров, где от оператора требуется только указать пункт назначения и привести систему в рабочий режим. В этом случае до пункта назначения ВАТС доедет без привлечения к управлению человека, то есть полностью автономно. И 4-го уровня, когда требуется помощь человека только в нестандартных ситуациях.

Преимущества ВАТС очевидны. Первое заключается в том, что оно позволяет убрать человека из опасных зон, связанных с воздействием на него опасных и вредных производственных факторов, в том числе вредных химических и радиоактивных веществ, которые воздействуют на человека при работе в карьерах по добыче полезных ископаемых. Уже в 2008 года в стране появились первые беспилотные карьерные самосвалы. И сегодня такая техника разрабатывается в России. Например, одной из перспективных моделей является совместная разработка КамАЗа и МГТУ им. Н. Э. Баумана КамАЗ-6561 в рамках проекта «Создание

семейства электромеханических беспилотных автомобилей-самосвалов большой грузоподъемности в интересах добывающих отраслей промышленности РФ [8].

Во-вторых, ВАТС позволят помочь решить проблему нехватки рабочих рук в стране, уменьшить приток мигрантов в Россию.

В-третьих, по данным статистики, в 90 % случаев виновником дорожно-транспортного происшествия является водитель, который не выполнял требования правил дорожного движения. При этом в 12,5 % случаев у водителей транспортных средств были обнаружены признаки алкогольного опьянения, в 20 % случаев водитель находился в болезненном или уставшем состоянии. Учитывая это, некоторые исследователи прогнозируют снижением аварийности на дорогах на 70–80 % при замене человека на ВАТС 5-го уровня [9, 10]. Насколько реально последнее утверждение?

Для того чтобы ВАТС могли функционировать, они оснащаются множеством приборов: лидарами, камерами и стереокамерами, радары и различными датчиками, которые позволяют составить трехмерную карту пространства вокруг автомобиля, определить расстояние до стационарных объектов на пути движения и движущихся транспортных средств, определить их скорость и направление движения, считать дорожную разметку и определить требования установленных дорожных знаков. Полученная информация анализируется компьютерной программой, формирующей сигналы управления ВАТС. Однако, как бы совершенна ни была техника, случаются отказы и сбои в ее работе, которые необходимо фиксировать, анализировать и учитывать при ее совершенствовании. Рассмотрим некоторые знаковые примеры отказов автопилотов, приведшие к травмиро-

ванию или гибели людей. Отметим, что это прежде всего более опасные системы 2-го уровня. Однако их недостатки надо идентифицировать, чтобы они не перекочевали на более высокие 4-й и 5-й уровни.

7 мая 2016 года в США автомобиль Tesla Model S при движении по шоссе с включенным автопилотом на фоне ярко освещенного неба не идентифицировал, как и водитель, трейлер светлого цвета, из-за чего тормозная система не была активирована. Водитель погиб. Компания Tesla отметила, что это первый случай за более чем 210 млн км, пройденных автомобилями данной марки в автономном режиме. В среднем же в мире гибель человека в ДТП приходится на каждые 97 млн км пробега автомобилей [11].

Аналогичная авария произошла в мае 2018 года, когда автопилот Tesla Model S, как и в предыдущем случае, не идентифицировал остановившуюся на светофоре ярко окрашенную пожарную машину. Перед столкновением система автономного управления автомобилем не пыталась тормозить и даже ускорила с 89 до 97 км/ч. В данном случае водитель получил легкие травмы [12].

Отказы автопилота на электромобилях часто усугубляют последствия ДТП. Это связано с тем, что большинство таких случаев происходит на большой скорости, из-за того что электроника сработала некорректно, водитель проигнорировал предупреждение о необходимости перейти на ручное управление или система автономного управления не заметила препятствия на пути машины. И если при дорожно-транспортных происшествиях на небольшой скорости водители серьезных повреждений не получают и воспламенение вследствие теплового разгона в аккумуляторной батарее происходит не сразу, давая возможность водителю и пассажи-

рам покинуть электромобиль, то при высоких скоростях воспламенение происходит до того, как пострадавшим в аварии смогут оказать помощь. Так, 23 марта 2018 года в США Tesla Model X с применением передовых систем помощи водителю потерял управление и на скорости 120 км/ч врезался в бетонный барьер. Практически сразу электромобиль загорелся и взорвался. Водитель погиб. Там же 8 мая 2018 года Tesla Model S также с использованием автопилота на скорости около 100 км/ч врезался в бетонную стену и мгновенно воспламенился. Двое подростков в машине погибли от термического воздействия. 24 февраля 2019 года там же Tesla Model 3 врезался в пальму, воспламенился, водитель погиб в огне [13, 14]. Причиной опять была некорректная работа передовых систем помощи водителю.

Появились и жертвы-пешеходы. Считается, что первый случай, связанный с гибелью пешехода, произошел 19 марта 2018 года, когда автомобиль Uber, работавший в автономном режиме под наблюдением водителя, сбил женщину, которая от полученных травм скончалась [15]. Происшествие произошло вне пешеходного перехода, когда неожиданно из неосвещенного пространства на дорогу перед автомобилем вышла женщина. Система автономного управления восприняла ее как «незначительный объект». Попытки затормозить ВАС не предпринимало.

Это одни из самых известных случаев, широко освещенных в прессе. И автомобильные компании, продвигающие технологии 4-го и 5-го уровня на автомобильный рынок, всячески подчеркивали более низкий риск попадания в ДТП при применении таких технологий. Однако появившееся расследование NHTSA (национальной администрации безопасности дорожного движения США)

в середине 2022 года [16] поставило данные утверждения под большой вопрос. Анализ данных за рассмотренный период показал, что на территории США произошло 392 аварии с участием передовых систем помощи водителю. Из них 70 % — это автомобили Tesla. И количество аварий может быть гораздо больше, так как, по данным регулирующих органов, автомобили Tesla отключают усовершенствованную систему помощи водителю (автопилот) примерно за одну секунду до удара. За тот же период Honda сообщила о 90 авариях с участием передовых систем помощи водителю, а Subaru — о 10.

Одной из особенностей автопилотов, в том числе Tesla, является то, что на высоких скоростях автопилот не будет резко тормозить перед неподвижными объектами, так как это может привести к большему риску, особенно при ложном срабатывании. Об этом предупреждает руководство по эксплуатации Tesla, где говорится, что при скорости движения более 80 км/ч, когда с полосы движения, по которой движется автомобиль, уходит впереди двигающееся транспортное средство и на данной полосе находится неподвижное препятствие, автопилот, скорее всего, не сможет затормозить машину [17]. Таким образом, на сегодняшний день самой большой опасностью для использования автопилота остается внезапное появление стационарных объектов на пути автомобиля при движении на высоких скоростях. Другие автомобили с автопилотом также имеют это ограничение. Например, в руководстве Volvo XC90 Pilot Assist говорится: «Pilot Assist игнорирует неподвижный автомобиль и вместо этого разгоняется до сохраненной скорости... Затем водитель должен вмешаться и нажать на тормоза». Эта особенность связана с тем, что радар, используемый в большинстве

автомобильных приложений, предназначен для обнаружения движущихся объектов. Отсюда следует вывод, что производителям необходимо объединить данные с радара и камер, чтобы обеспечить очень высокий уровень уверенности в том, что на полосе движения есть препятствие, и принять меры или предупредить водителя. На сегодняшний день не существует надежного решения данной проблемы, которое какой-либо производитель внедрил для борьбы с внезапно появляющимися стационарными объектами при движении на больших скоростях. Например, Tesla удалила менее детализированную радарную систему, чтобы сосредоточиться на компьютерном зрении (так называемое Tesla Vision), но еще неизвестно, будет ли оно более точным и сможет ли справиться с такими ситуациями.

Еще одной проблемой автопилота является то, что он предназначен для того, чтобы оставаться между дорожными линиями (разметкой) с помощью камер и датчиков, но поскольку при ремонтных работах, строительстве автодорог разметка может продолжаться за препятствием (бетонный блок, установленные ограждения), системы автомобиля не позволяют избежать столкновения с ними.

Также возникают большие проблемы при движении на съездах с автомагистралей и в горах.

Как отмечалось ранее, для эксплуатации ВАС необходимы многочисленные датчики, радары, лидары, камеры, которые делают стоимость такого транспортного средства очень высокой, но не обеспечивают в полной мере безопасность участников дорожного движения. Снежные зимы, плохое содержание дорог, солнце над горизонтом приводят к сбоям в работе камер, высокая стоимость лидаров

и малое количество доступной информации от радаров вынуждают искать альтернативные источники информации об участниках движения, дорожном покрытии, проводимых дорожных работах. Источником такой информации может стать внедрение в России цифровой инфраструктуры, под которой в материалах Европейской комиссии понимают «Статическое и динамическое цифровое отображение физического мира, с которым ВАС будут взаимодействовать в процессе эксплуатации посредством сбора, обработки и передачи информации». Внедрение цифровой инфраструктуры и взаимодействие с ней ВАС в значительной мере позволяет повысить безопасность движения при использовании технологий V2I, V2V, V2X.

Технология «Транспортное средство-инфраструктура» (V2I) — это коммуникационная структура, которая позволяет нескольким транспортным средствам обмениваться информацией с различными устройствами, поддерживающими систему автомагистралей. Эти устройства включают в себя среди прочего считыватели RFID, камеры, устройства для обозначения полос движения, паркоматы. Технология V2I, основанная на сети аппаратного, программного и встроенного программного обеспечения, является беспроводной и двунаправленной: информация от устройств инфраструктуры легко передается в автомобиль через специальную сеть и наоборот. Подобно технологии «автомобиль-автомобиль» (V2V), V2I использует выделенные частоты связи ближнего действия (DSRC) для передачи данных. Датчики V2I используются в интеллектуальной транспортной системе для сбора данных и выдачи участникам дорожного движения предупреждений в режиме реального времени о различных происшествиях на дороге: пробках,



дорожных работах, дорожных условиях, парковочных зонах и т. д.

Системы «От транспортного средства к транспортному средству» (V2V) и «От транспортного средства к инфраструктуре» (V2I) предназначены предотвращать происшествия на дорогах и используются для повышения энергоэффективности транспортных средств. Технологии V2V и V2I позволяют транспортным средствам обмениваться данными друг с другом в режиме реального времени, что позволяет им прогнозировать, что произойдет дальше. Оснащение транспортных средств технологией V2I, способной передавать, получать и обрабатывать соответствующую информацию, обеспечивает инновационный эффект в плане безопасности и экономичности перевозок.

Технология V2X (Vehicle-to-Everything — автомобиль, подключенный ко всему) позволит автомобилю взаимодействовать с другими транспортными средствами и окружающей дорожной инфраструктурой в режиме реального времени. Основное требование к системам связи (4G, 5G) — это надежная и быстрая передача требуемого объема данных [18].

Другим важным моментом, о котором не следует забывать, является то, что система управления ВАТС, как любая программа, может быть взломана, в том числе террористами. И тогда многотонный грузоперевозчик, управляемый ВАТС, фактически становится «бомбой» на дороге.

Неурегулированным вопросом является и ответственность за дорожно-транспортные происшествия, произошедшие с участием ВАТС. Например, Tesla четко заявляет, что потребитель несет полную ответственность за использование технологии и должен всегда оставаться внимательным: применяемые на сегодняшний день системы не являются

полностью автономными. Это отличается от других производителей автомобилей, таких как Volvo или Cadillac, которые имеют гораздо более ограниченную систему самостоятельного вождения, но несут ответственность за аварии, пока эти системы активны. На сегодняшний день в России, в рамках проводимого эксперимента, ответственность за ДТП с участием ВАТС при отсутствии виновных действий со стороны других участников дорожного движения возлагается на собственника ВАТС. Однако, как указывалось выше, такие проблемы, как ненадлежащее состояние дорожной сети, проблемы с разметкой, установкой оградительных устройств и ряд других, также могут быть причиной дорожно-транспортных происшествий, но уголовную ответственность виновные за ДТП по этим причинам не несут.

Таким образом, можно констатировать, что обеспечение безопасности при эксплуатации ВАТС — сложная инженерная задача, решение которой требует совместных действий разработчиков транспортных средств и тех, кто занимается проектированием в России цифровой инфраструктуры. Несомненно, что координировать их работу должно государство, в том числе в рамках национального проекта «Цифровая экономика», в котором предусмотрен проект «Информационная инфраструктура», а также направление «Умный городской транспорт» в рамках проекта «Умный город».

### Библиографический список

1. Автопилот [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82> (дата обращения: 09.01.2023).
2. Автоматическое управление поездами [Электронный ресурс]. URL: <https://lokomotiv.ru/scb/>

avtomaticheskoe-upravlenie-poezdami.html (дата обращения: 05.01.2023).

3. Постановление Правительства РФ от 26 ноября 2018 г. № 1415 «О проведении эксперимента по опытной эксплуатации на автомобильных дорогах общего пользования высокоавтоматизированных транспортных средств» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/72113462/> (дата обращения: 05.01.2023).

4. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011) [Электронный ресурс]. URL: [https://sudact.ru/law/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuza-ot-09122011-n\\_19/tr-ts-0182011/](https://sudact.ru/law/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuza-ot-09122011-n_19/tr-ts-0182011/) (дата обращения: 07.01.2023).

5. Правила Организации Объединенных Наций, которые применяются Российской Федерацией в силу участия в Соглашении о принятии единых образных технических предписаний для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и (или) использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях взаимного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний, заключенном в г. Женеве 20 марта 1958 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902259041> (дата обращения: 08.01.2023).

6. Трасса М11 «Нева» станет беспилотным транспортным коридором. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/06/03/872614-trassa-m11-neva> (дата обращения: 09.01.2023).

7. Постановление Правительства Российской Федерации от 17.10.2022 № 1849 «Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств в отношении реализации инициативы «Беспилотные логистические коридоры» на автомобильной дороге общего пользования федерального значения М-11 «Нева» [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210200037> (дата обращения: 09.01.2023).

8. 8 беспилотных российских автомобилей, которые появятся на дорогах в ближайшие годы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iphones.ru/iNotes/8-sovremennyh-bespilotnyh-rossiyskih-avtomobiley-o-kotoryh-vy-ne-slyshali-no-oni-vot-vot-poyavyatsya-na-dorogah-08-05-2021> (дата обращения: 15.01.2023).

9. Чучаев А. И., Маликов С. В. Ответственность за причинение ущерба высокоавтоматизированным транспортным средством: состояние и перспективы // Актуальные проблемы Российского права. 2019. № 6. С. 117–124.

10. Административно-правовое регулирование участия высокоавтоматизированных транспортных средств в дорожном движении [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/100carmain.pdf> (дата обращения: 14.01.2023).

11. Автопилот Tesla: первая смерть [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/u/news/t/395601/> (дата обращения: 17.01.2023).

12. За рулем робот: аварии, в которых виноват автопилот [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autonews.ru/news/5be4498c9a7947707744ab2b> (дата обращения: 17.01.2023).

13. Behind the wheel of a robot: accidents in which the autopilot is to blame [Electronic resource]. URL: <https://www.autonews.ru/news/5be4498c9a7947707744ab2b>. (Accessed 01.31.2023) (Date of access: 01.22.2023).

14. Killer autopilot. The five most dangerous accidents involving Tesla [Electronic resource]. URL: <https://360tv.ru/tekst/obschestvo/avtopilot-ubijtsa/> (Accessed 12.26.2022).

15. Uber Halts Autonomous Car Tests After Fatal Crash in Arizona [Electronic resource]. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-19/uber-autonomous-car-involved-in-fatal-crash-in-arizona> (Date of access: 01.02.2023).

16. Teslas running Autopilot involved in 273 crashes reported since last year [Electronic resource].

URL: <https://www.washingtonpost.com/technology/2022/06/15/tesla-aut-10.20295/1815-588X-2024-01-76-84-opilot-crashes/> (Accessed 01.22.2023).

17. Tesla Autopilot Crashes and Causes [Electronic resource]. URL: <https://www.autopilotreview.com/tesla-autopilot-accidents-causes/> (Date of access: 01.21.2023).

18. Евстигнеев И. А. Дорожная инфраструктура и высокоавтоматизированные транспортные средства [Электронный ресурс]. URL: [\(https://cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2\(13\)-07.Evstigneev\(Road-infrastructure\)\)](https://cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2(13)-07.Evstigneev(Road-infrastructure)) (дата обращения: 18.02.2024).

ru/2019/13/CADGIS-2019-2(13)-07.Evstigneev(Road-infrastructure) (дата обращения: 18.02.2024).

Дата поступления: 01.02.2024

Решение о публикации: 22.02.2024

#### Контактная информация:

КАНОНИН Юрий Николаевич — канд. техн. наук, доцент; [yu.n.kanonin@yandex.ru](mailto:yu.n.kanonin@yandex.ru)

## Safety issues when operating highly automated vehicles

### Yu. N. Kanonin

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

**For citation:** *Kanonin Yu. N. Safety problems during the operation of highly automated vehicles // Proceedings of Petersburg Transport University 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 76–84. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-76-84*

#### Abstract

**Purpose:** analysis of the control systems of highly automated vehicles currently in use in Russia and abroad, the dangers and problems that arise during the operation of VATS. **Methods:** search and analysis of information about existing VATS for existing problems and possible solutions to them. **Practical significance:** an analysis of options for the use of highly automated vehicles was carried out, problems during their operation and possible solutions to problems were shown.

**Keywords:** highly automated vehicles (VATS), unmanned transport corridor, advantages and disadvantages of VATS.

#### References

1. Avtopilot [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82> (data obrashhenija: 09.01.2023). (In Russian)

2. Avtomaticheskoe upravlenie poezdami [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://lokomо.ru/scb/avtomaticheskoe-upravlenie-poezdami.html> (data obrashhenija: 05.01.2023). (In Russian)

3. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 26 nojabrja 2018 g. № 1415 “O provedenii jeksperimenta po opytnoj jekspluatácii na avtomobil'nyh dorogah obshhego pol'zovanija vysokoavtomatizirovannyh transportnyh sredstv” (s izmenenijami i dopolnenijami) [Jelektronnyj

resurs]. URL: <https://base.garant.ru/72113462/> (data obrashhenija: 05.01.2023). (In Russian)

4. Tehnicheskij reglament Tamozhennogo sojuza “O bezopasnosti kolesnyh transportnyh sredstv” (TR TS 018/2011) [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://sudact.ru/law/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuza-ot-09122011-n\\_19/tr-ts-0182011/](https://sudact.ru/law/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuza-ot-09122011-n_19/tr-ts-0182011/) (data obrashhenija: 07.01.2023). (In Russian)

5. Pravila Organizacii Ob#edinennyh Nacij, kotorые primenjajutsja Rossijskoj Federaciej v silu uchastija v Soglashenii o prinjatii edinoobraznyh tehnicheskikh predpisanij dlja kolesnyh transportnyh sredstv, predmetov oborudovanija i chastej, kotorye mogut byt' ustanovleny i (ili) ispol'zovany na kolesnyh transport-

nyh sredstvah, i ob usloviyah vzaimnogo priznanija oficial'nyh utverzhdenij, vydavaemyh na osnove jetih predpisanij, zakljuchennom v g. Zheneve 20 marta 1958 g. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902259041> (data obrashhenija: 08.01.2023). (In Russian)

6. Trassa M11 "Neva" stanet bespilotnym transportnym koridorom. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/06/03/872614-trassa-m11-neva> (data obrashhenija: 09.01.2023). (In Russian)

7. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 17.10.2022 № 1849 "Ob ustanovlenii jeksperimental'nogo pravovogo rezhima v sfere cifrovych innovacij i utverzhdenii Programmy jeksperimental'nogo pravovogo rezhima v sfere cifrovych innovacij po jekspluatacii vysokoavtomatizirovannyh transportnyh sredstv v otnoshenii realizacii iniciativy "Bespilotnye logisticheskie koridory" na avtomobil'noj doroge obshhego pol'zovanija federal'nogo znachenija M-11 "Neva" [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210200037> (data obrashhenija: 09.01.2023). (In Russian)

8. 8 bespilotnyh rossijskih avtomobilej, kotorye pojavjatsja na dorogah v blizhajshie gody [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.iphones.ru/iNotes/8-sovremennyh-bespilotnyh-rossijskih-avtomobilej-o-kotoryh-vy-ne-slyshali-no-oni-vot-vot-poyavyatsya-na-dorogah-08-05-2021> (data obrashhenija: 15.01.2023). (In Russian)

9. Chuchaev A. I., Malikov S. V. Otvetstvennost' za prichinenie ushherba vysokoavtomatizirovannym transportnym sredstvom: sostojanie i perspektivy // Aktual'nye problemy Rossijskogo prava. 2019. № 6. S. 117–124. (In Russian)

10. Administrativno-pravovoe regulirovanie uchastija vysokoavtomatizirovannyh transportnyh sredstv v dorozhnom dvizhenii [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/100carmain.pdf> (data obrashhenija: 14.01.2023). (In Russian)

11. Avtopilot Tesla: pervaja smert' [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://habr.com/u/news/t/395601/> (data obrashhenija: 17.01.2023). (In Russian)

12. Za rulem robot: avarii, v kotoryh vinovat avtopilot [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.autonews.ru/news/5be4498c9a7947707744ab2b> (data obrashhenija: 17.01.2023). (In Russian)

13. Behind the wheel of a robot: accidents in which the autopilot is to blame [Electronic resource]. URL: <https://www.autonews.ru/news/5be4498c9a7947707744ab2b>. (Accessed 01.31.2023) (Date of access: 01.22.2023).

14. Killer autopilot. The five most dangerous accidents involving Tesla [Electronic resource]. URL: <https://360tv.ru/tekst/obschestvo/avtopilot-ubijtsa/> (Accessed 12.26.2022).

15. Uber Halts Autonomous Car Tests After Fatal Crash in Arizona [Electronic resource]. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-19/uber-autonomous-car-involved-in-fatal-crash-in-arizona> (Date of access: 01.02.2023).

16. Teslas running Autopilot involved in 273 crashes reported since last year [Electronic resource]. URL: <https://www.washingtonpost.com/technology/2022/06/15/tesla-autopilot-crashes/> (Accessed 01.22.2023).

17. Tesla Autopilot Crashes and Causes [Electronic resource]. URL: <https://www.autopilotreview.com/tesla-autopilot-accidents-causes/> (Date of access: 01.21.2023).

18. Evstigneev I. A. Dorozhnaja infrastruktura i vysokoavtomatizirovannye transportnye sredstva [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2\(13\)-07](https://cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2(13)-07). Evstigneev (Road-infrastructure) (data obrashhenija: 18.02.2024). (In Russian)

Received: 01.02.2024

Accepted: 22.02.2024

**Author's information:**

Yuri N. KANONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; [yu.n.kanonin@yandex.ru](mailto:yu.n.kanonin@yandex.ru)

УДК 69:69.07:692:699.86:699.88

## **Анализ напряженно-деформированного состояния узловых соединений высотных зданий при учете климатических воздействий**

**Т. А. Белаш<sup>1</sup>, А. В. Кузнецов<sup>2</sup>, Д. Г. Володченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО «Научно-исследовательский центр «Строительство», 109428, Россия, Москва, 2-я Институтская ул., 6

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

**Для цитирования:** *Белаш Т. А., Кузнецов А. В., Володченко Д. Г. Анализ напряженно-деформированного состояния узловых соединений высотных зданий при учете климатических воздействий // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 85–102. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-85-102*

### **Аннотация**

**Цель:** проанализировать конструктивные решения узлов сопряжения перекрытий с наружными стенами в зданиях, возводимых по монолитной технологии. Выявить дефекты и повреждения, возникающие на фасадах и дисках перекрытий с перфорацией под термовкладыши в процессе возведения и эксплуатации. Исследовать численными методами напряженно-деформированное состояние диска перекрытия на участке узлов сопряжения с наружной стеной с учетом температурных воздействий. **Материалы и методы:** рассмотрен стандартный вариант узлового соединения монолитного здания различной этажности. Фрагмент узла сопряжения диска перекрытия со стеной моделировался в программных комплексах Ansys и SCAD. Модель состояла из анизотропного материала — бетона и включенными в нее арматурными стержнями. Исследовалось поведение напряженно-деформированного состояния при различных температурных воздействиях. **Результаты:** численным способом, с учетом геометрических параметров и температурных нагрузок, выявлены закономерности, влияющие на характер изменений величин нормальных напряжений в характерных сечениях перфорированной плиты. Дана оценка существующим типам конструктивных решений. Определены места зон концентрации напряжений и их влияние на эксплуатационные качества. **Практическая значимость:** показано, что наиболее опасное сечение в перфорированных дисках перекрытиях под термовкладыши проходит в местах шпоночных соединений. Определено, что уязвимость в таких соединениях вызвана влиянием знакопеременных циклических температур. Установлены закономерности, приводящие к росту нормальных напряжений в местах концентрации напряжений. Предложены принципиально новые конструктивные решения, защищенные патентами на полезные модели, позволяющие снизить значения напряжений и тем самым обеспечить более высокие эксплуатационные качества в монолитных зданиях, включая и высотные.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, железобетонные монолитные перекрытия, численные методы расчета, температурно-климатические воздействия, конструктивные решения.

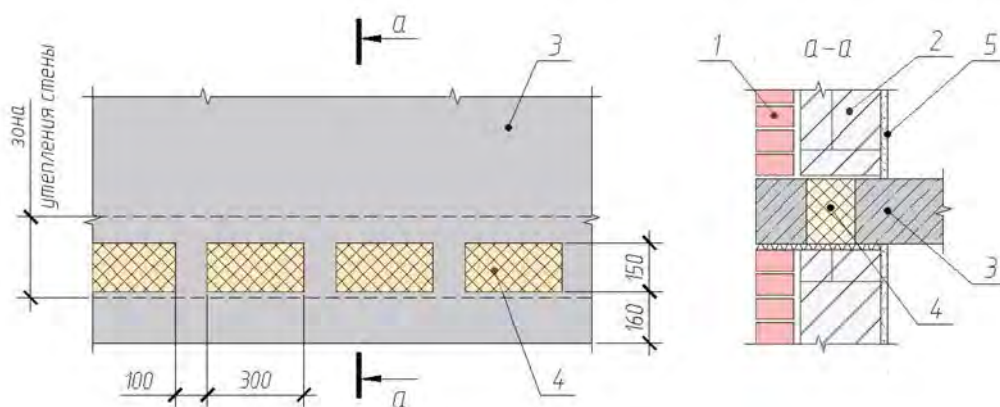
## Введение

В урбанизированной среде Российской Федерации монолитное домостроение является наиболее распространенным типом гражданского строительства [1]. Высокие темпы возведения монолитных зданий [4] способствуют решению социальных задач, связанных с приоритетными направлениями государственной жилищной политики. Массовое возведение таких многоэтажных комплексов характеризуется перекрестно-стеновой конструктивной схемой. Конструктивные решения наружных стен представляют собой чаще всего трехслойные стеновые конструкции (внутренний слой – утеплитель – лицевой слой), опирающиеся на консольную часть монолитного диска перекрытия.

Исследования показали, что для зданий, выполненных по монолитной конструктивной системе, характерны различные варианты устройств узлов сопряжений дисков перекрытий с наружными стеновыми конструкциями [2, 3]. В практике строительства наибольшее распространение получили конструктивные решения, выполненные по типу, представленному на рис. 1. Этот тип

узла отличается наличием участков перфорации в консольной части плиты, заполняемых вкладышами из пенополистирола, или иного теплоизолирующего материала. Шаг перфорации регулярный, ширина перфорации (термовставки) обычно соответствует толщине теплоизоляционного слоя стены и расположена в его створе. Данное решение соответствует рекомендациям, изложенным в СП 230.1325800.2015.

Очевидно, что и стена, и перекрытие в области соединения представляют собой тепло-технически неоднородные элементы. Однако на практике, из-за ускоренного процесса проектирования, несколько важных эксплуатационных характеристик монолитных зданий на стадии разработки проектной и рабочей документации полностью не учитываются. Среди таких параметров можно выделить тепловлажностный режим помещений, воздействие температурно-климатических условий на напряженно-деформированное состояние узловых соединений монолитных зданий [4], а также вопросы безопасности и долговечности [5, 6, 7]. Также в связи со сжатыми



**Рис. 1.** Стандартный узел сопряжения диска перекрытий с наружной стеной:

- 1) наружный (лицевой) слой — лицевой кирпич; 2) внутренний слой — газобетон;
- 3) диск перекрытия; 4) теплоизоляция (термовкладыш); 5) отделочный слой

сроками строительства наблюдаются отступления от рабочей документации, приводящие к дефектам конструкции, возникающим при производстве работ [5].

Недооценка важности учета климатических воздействий, недостаточная информированность инженеров о сложных микропроцессах, протекающих в нагруженных конструкциях, работающих в условиях переменной температуры и влажности и отсутствие однозначной методики учета указанных воздействий, на стадии проектирования и строительства монолитных зданий приводит к различным дефектам и повреждениям как ограждающих, так и несущих элементов конструкций [9–11].

Проведенные натурные исследования узлов вышеуказанной конструкции выявили их недостаточные эксплуатационные качества, такие как: теплотехнические дефекты и повреждения в виде трещин, деструкции материала в местах сопряжения узловых соединений железобетонных перекрытий с наружными стеновыми конструкциями из штучного материала [12, 13]. Причиной выявленных дефектов могут быть ошибки и недоработки в проектной документации, отступления от проекта на стадии возведения зданий, а также отсутствие удобной методики учета данных механизмов воздействия на конструкции. Совокупность указанных факторов может спровоцировать аварийные ситуации [14, 15, 16, 17], а в перспективе привести к значительным технико-экономическим затратам, связанных с ремонтом и восстановлением эксплуатационных качеств.

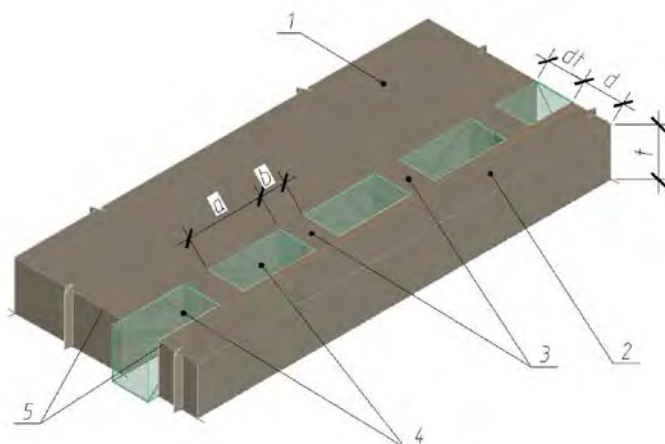
### Методы исследования

В соответствии с Приложением Г.3, СП 230.1325800.2015 вариативность шага перфорации  $a/b$  принимается в диапазоне от 1/1 до

1/5 с последующим устройством термовкладышей в торцевой части плиты перекрытия. Однако наиболее широкое распространение получило соотношение 3/1, так как меньшая доля утеплителя в конструкции плиты увеличивает значения удельных тепловых потерь и может привести к промерзанию перфорированного участка диска перекрытия, а при больших соотношениях возникает необходимость проверки прочности несущей конструкции. Нужно отметить, что большинство проектировщиков принимают шаг перфорации 3/1, по умолчанию, без учета конструкции стены. И если в случае балконного вылета обычно производится минимальный комплекс расчетов по предельным состояниям, то со стороны торцов плит перекрытий несущая способность шпонок и торцевого бруса считается обеспеченной по умолчанию. Общая схема перфорации диска перекрытия представлена на рис. 2, на котором обозначены основные геометрические параметры, длина термовкладыша —  $a$ , длина шпонки —  $b$ , ширина термовкладыша —  $dt$ , толщина плиты —  $t$ .

С целью снижения влияния мостиков холода на микроклимат помещений применяется перфорация плиты для установки термовкладышей из пенополистирола или другого материала, обладающего хорошими теплоизолирующими свойствами. Важно геометрически совмещать размещение термовкладыша в перфорации с утеплителем в стене, что предусмотрено, например СП 230.1325800, однако в условиях стройплощадки это требование не всегда выполняется [30].

При разработке конструктивных решений узловых соединений с наружной ненесущей многослойной стеной для обеспечения требуемых показателей энергоэффективности монолитных зданий принято руководствоваться



**Рис. 2.** Схема расположения торца диска перекрытия с перфорацией: 1 — перекрытие; 2 — торцевой брус; 3 — шпонки; 4 — перфорация, заполненная утеплителем; 5 — зона утеплителя стены

Приложением Г.3, СП 230.1325800, в котором представлены значения удельной потери теплоты  $\psi$ , Вт/(м $\cdot$ °С) для различных вариантов конструкции наружных стен. Однако в литературных источниках сведения о влиянии отношения  $a/b$  на напряженно-деформированное состояние (далее — НДС) плиты перекрытия в зоне перфорации при температурных воздействиях отсутствуют [18, 19, 20]. Несмотря на большой объем выполненных ранее исследований, анализ совместного действия внешних нагрузок от веса наружной стены и от температурных перепадов на НДС торцевого бруса и бетона между участками перфорации также в достаточном объеме в литературе практически не рассматривался. Обычно этими напряжениями пренебрегают в силу их предполагаемой малости, тем не менее для того, чтобы убедиться в справедливости данного допущения следует произвести соответствующий анализ.

Рассмотрим монолитное здание с перекрестно-стеновой конструктивной схемой, с узлом примыкания наружных стен, выполненным с устройством перфорации в торце

плиты. Выделим типовой фрагмент диска перекрытия с перфорацией — на прямом участке фасада между поперечными несущими стенами. Ниже, на рис. 3 приведен вариант армирования торцевого участка плиты при наличии перфорации.

Оценка и анализ НДС трехмерной расчетной модели перфорированного диска перекрытия от температурно-климатических воздействий проводился численными методами в программном комплексе ANSYS. В качестве граничных условий принимался наиболее неблагоприятный вариант температурного воздействия для Санкт-Петербурга: нормативные значения изменений средних температур по сечению элемента в теплом и холодное время года:  $\Delta t_w = 20,1$  °С и  $\Delta t_c = -25,96$  °С.

Для учета усилий и напряжений, возникающих в торцевом бруске и шпонках от собственного веса плиты перекрытия и веса стеновых конструкций, была создана модель в расчетном комплексе SCAD. Класс бетона принят В20, класс арматуры А500. В каждой шпонке предусмотрено размещение 4 стержней

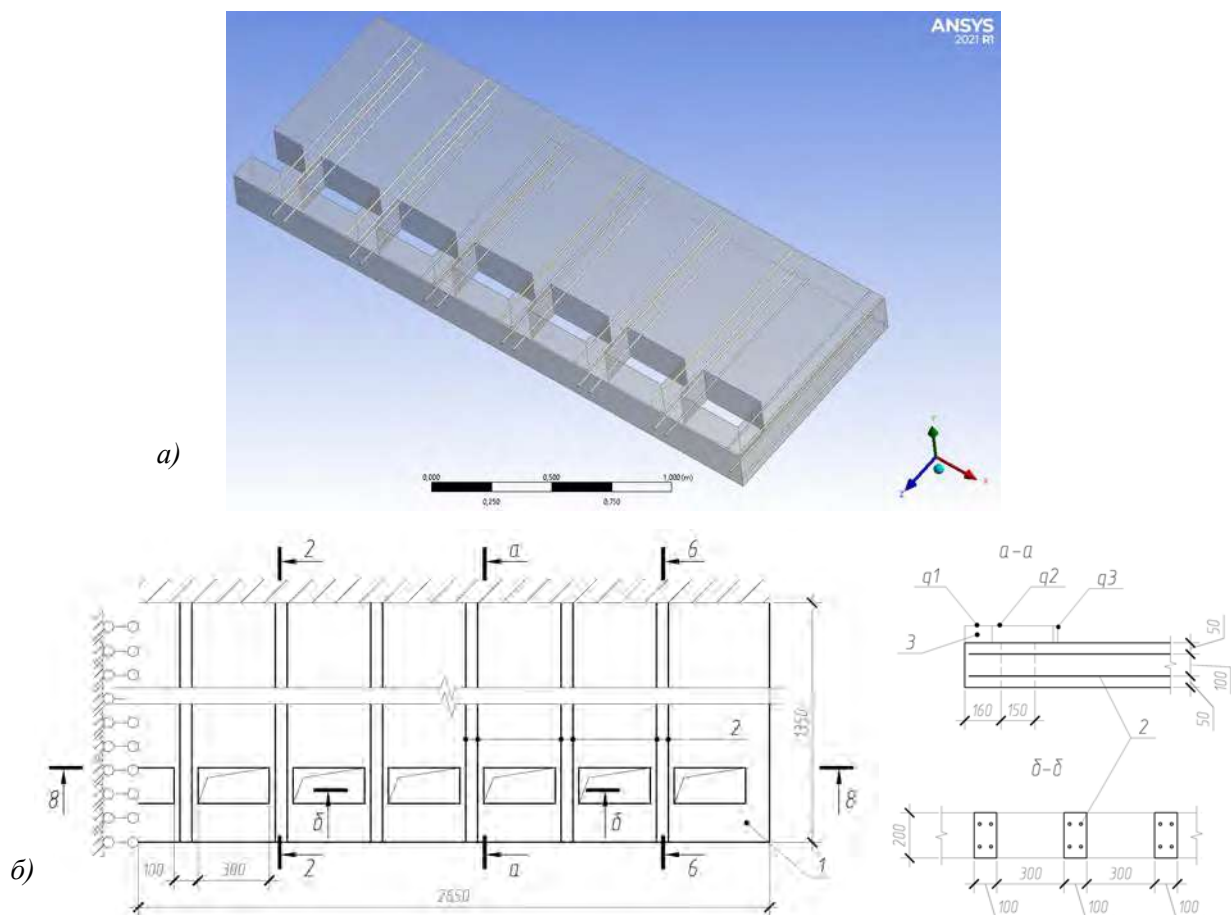


диаметром 12 мм из арматуры А500. Эти данные аналогичны ранее созданной модели ANSYS для анализа температурных напряжений.

Модель выстроена при помощи объемных элементов (тип 36–8-узловой изопараметрический конечный элемент) с размером стороны 1 см. Эскиз расчетной модели представлен на рис. 3. Расчет выполнен в линейной постановке. Нагрузка от собственного веса перекрытия задается автоматически по объемному весу материала  $24,525 \text{ кН/м}^3$ . Нагрузка от ограждающей конструкции задается в виде равномерно распределенной по полосам, представляющим собой проек-

ции каждого из слоев наружной стены. При использовании усредненного по площади значения нагрузки, значения напряжений уменьшились примерно на 18%, данное упрощение неприемлемо, для дальнейших расчетов нагрузка от слоев стены прикладывается дифференцированно.

Номера сечений 2–2 и 6–6 соответствуют сечениям, в которых наблюдались наибольшие усилия от воздействия перепада температур. Сечение 8–8 (по внутренней, ближайшей к зданию плоскости шпонки, принято для рассмотрения, так как согласно температурному расчету, температура в этом сечении может достигать отрицательных величин).



**Рис. 3.** Расчетная схема фрагмента плиты в зоне устройства перфорации:

а) общий вид расчетной модели; б) геометрические параметры расчетной модели.

1 — железобетонное перекрытие; 2 — арматура; 3 — нагрузки от наружной стены

Дальнейшая оценка напряженно-деформированного состояния узла может быть произведена с учетом физической нелинейности деформирования железобетона, приводящей к неоднородности прочностных и деформационных свойств бетона и арматуры, а также с учетом образования и раскрытия трещин [21]. Перераспределение напряжений между бетоном и арматурой внутри элемента приведет к уменьшению их наибольших величин. Данный подход позволит построить модель, соответствующую реальной работе материала.

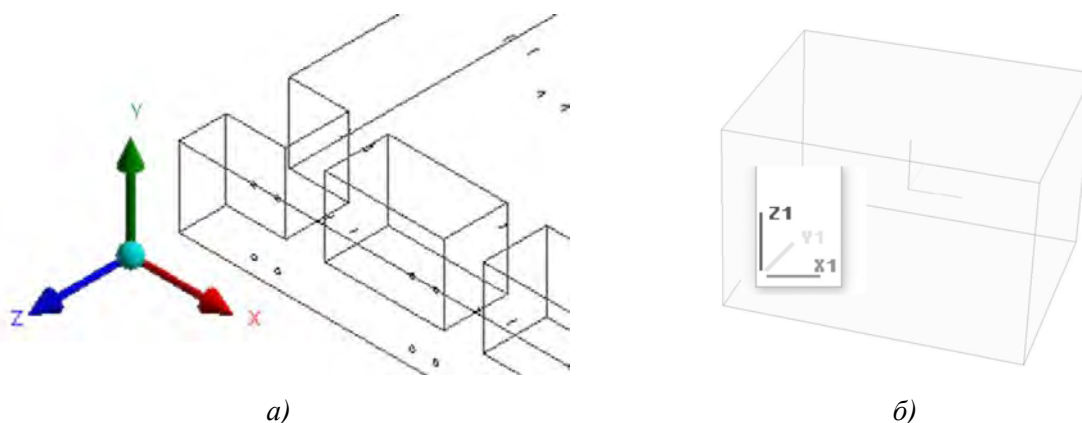
Расчетные модели, адекватно отражающие сложное напряженное состояние, возникающее при температурно-влажностных и силовых воздействиях на несущие конструкции, помогут получить обоснование более эффективных проектных решений в строительстве.

При объединении результатов температурного и статического расчетов выяснилось, что комплексы имеют разные системы ориентации осей (рис. 4), поэтому было принято решение все дальнейшие вычисления производить в системе отсчета SCAD (правая декартова система координат).

## Результаты и обсуждения

Перепады температуры и влажности наружного воздуха, а также солнечной радиации оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов несущих конструкций, расположенных в зоне непосредственного воздействия климатических факторов. Стеновые ограждающие конструкции зданий, а также диски перекрытий в зонах устройства перфорации испытывают существенные усилия, которые в ряде случаев являются причиной возникновения различного рода повреждений [22]–[27].

С целью определения характера НДС от температурных воздействий для исследуемой расчетной модели задавались граничные условия в виде температурных нагрузок, приложенных к торцу перфорированного диска перекрытия с наружной стороны и со стороны помещения. Перепады температуры внешней среды задавались в диапазоне от 0 до  $-40$  °С, температура конструкции внутри помещения принималась 20 °С. В результате анализа результатов было определено, что наибольшие напряжения возникали при температуре замыкания  $-25,96$  °С. Таким



**Рис. 4.** Системы координат и направление выдачи усилий в расчетных комплексах ANSYS и SCAD: а) общая система координат ANSYS; б) общая система координат SCAD

образом, расчетная разница температур составила  $45,96\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При построении послойных срезов температурных полей конструкции заданными температурами, в диапазоне от  $20$  до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , было показано появление отрицательных значений температуры конструкции, в зоне расположения шпоночных соединений, со стороны помещения.

При этих же значениях температурных нагрузок определены деформации удлинения (укорочения) торцевого бруса, максимальные значения которых составили  $0,75\text{ мм}$  при длине торцевого бруса  $2650\text{ мм}$  и соотношении  $a/b = 3/1$ . Относительные деформации растяжения при этом составили:  $\varepsilon = 0,75/2650 = 0,000283$ , что не превышает значения предельных относительных деформаций при сжатии  $\varepsilon_{b,0} = 0,0034$  и при растяжении  $\varepsilon_{b,0} = 0,0025$ .

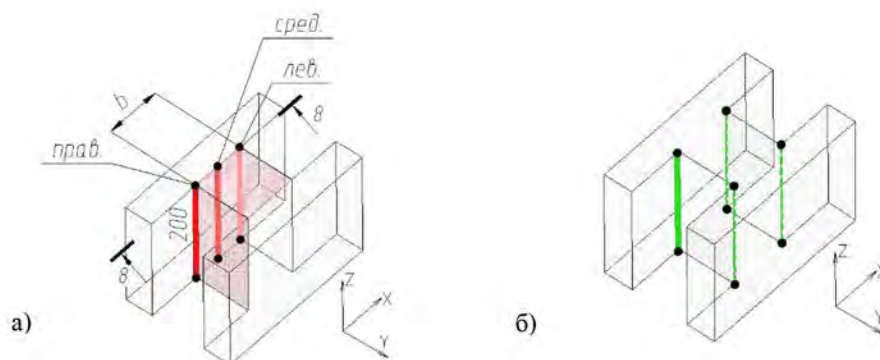
На рис. 5 показан фрагмент диска перекрытия на участке с перфорацией. Сечения, для которых численными исследованиями определялись нормальные напряжения  $\sigma_y$ , приняты в соответствии с рис. 5, а. Зелеными линиями помечены сечения, в которых возникают концентрации напряжений.

Полученные значения сравнивались с расчетным сопротивлением растяжению

$R_{bt} = 0,81\text{ МПа}$  для бетона класса В20 в соответствии с СП 63.13330.2018. Как видно из табл. 1, в расчетных сечениях возникают нормальные напряжения, превышающие расчетное сопротивление растяжению. Изополя напряжений в плите (рис. 6) указывают, что углы прямоугольных отверстий перфорации являются концентраторами напряжений, то есть именно с них будет начинаться процесс разрушения.

Фрагмент узла сопряжения диска перекрытия со стеной исследовался для периода с отрицательными температурами наружного воздуха, что для условий С.-Петербурга соответствует температуре замыкания конструкции, равной  $-25,96$  и  $20,13\text{ }^{\circ}\text{C}$  при эксплуатации в зимнее время. Рассмотрены нормальные напряжения  $\sigma_y$  с учетом температурных воздействий на конструкцию в холодный период года при соотношении  $a/b$  равном  $3/1$ . Отдельные результаты представлены на рис. 7 в виде эпюр нормальных напряжений  $\sigma_y$  для сечений 2–2/8–8, 6–6/8–8, проходящих по толщине перекрытия через шпонки в поперечном и продольном направлениях.

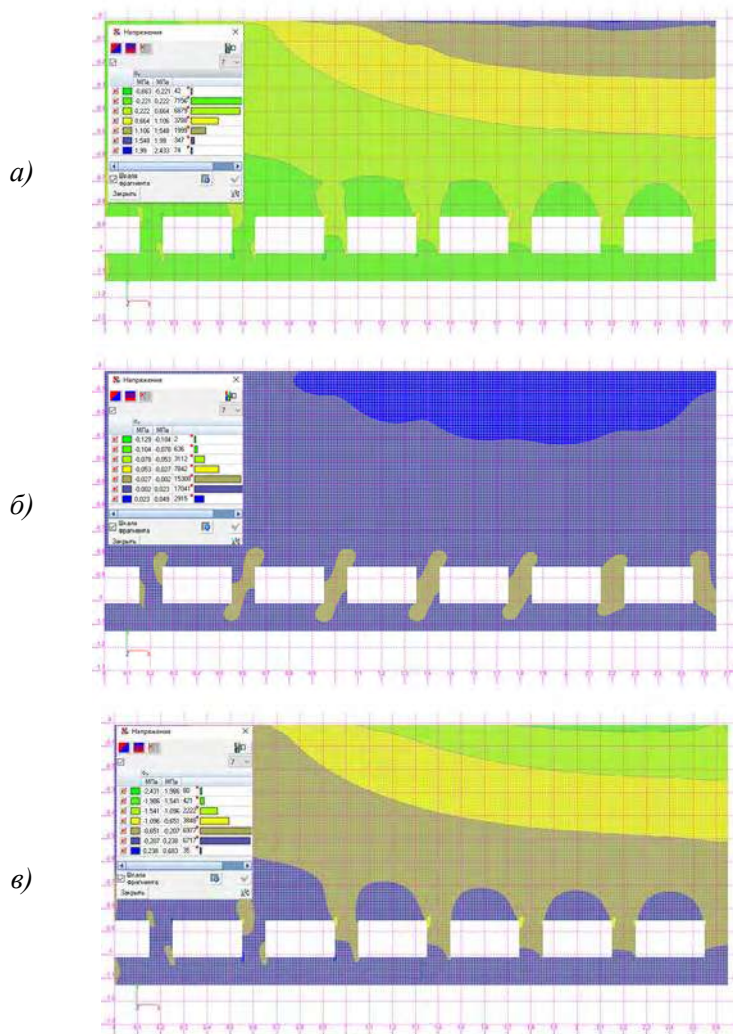
Для участка, расположенного в зоне сечения 8–8, характер изменений нормальных  $\sigma_y$  напряжений является знакопеременным и находится в диапазоне от  $-8,276$  до

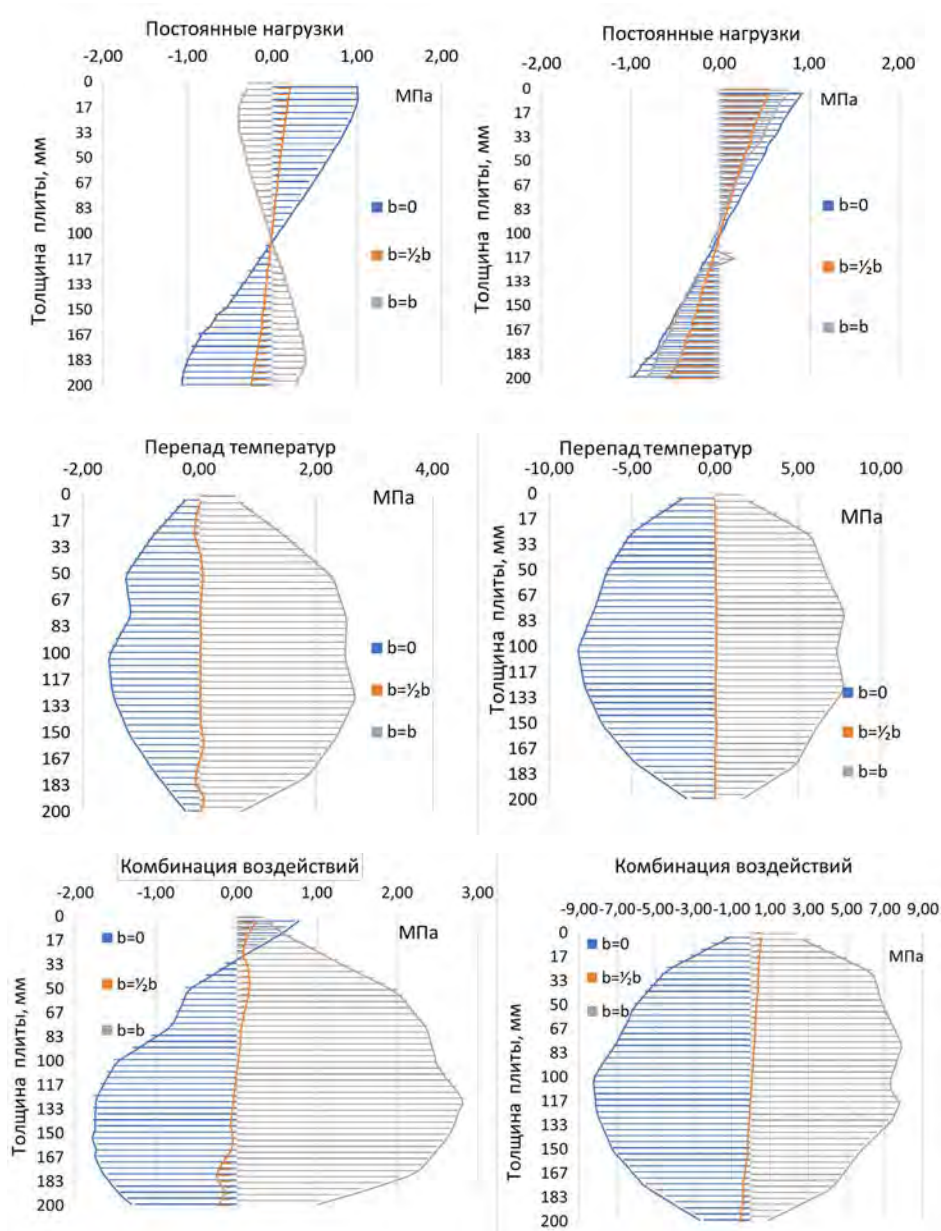


**Рис. 5.** Схема перемычки между участками перфорации на торце диска перекрытия:  
а) характерные сечения для анализа напряжений; б) сечения концентрации напряжений

ТАБЛИЦА 1. Максимальные и минимальные значения напряжений в сечениях 2–2/8–8, 6–6/8–8 от постоянных и температурных нагрузок

Положение	Сечение	Напряжения от перепада температуры $\Delta t = 45,96\text{ }^{\circ}\text{C}$		Напряжения от постоянных нагрузок		Суммарные напряжения	
		$\sigma_{y,t}$		$\sigma_{y,g}$		$\sigma_{y,s}$	
		$\sigma_{\min}$ , МПа	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$\sigma_{\max}$ , МПа
Правое ребро	2–2/8–8	-1,554	-0,184	-1,009	1,009	-1,881	0,807
Центр шпонки		-0,083	0,088	-0,249	0,228	-0,284	0,272
Левое ребро		0,618	2,684	-0,403	0,391	0,464	2,676
Правое ребро	6–6/8–8	-8,276	-1,437	-1,023	0,939	-8,276	-0,498
Центр шпонки		-0,011	0,088	-0,618	0,560	-0,629	0,572
Левое ребро		1,651	7,820	-0,863	0,774	0,788	7,883

Рис. 6. Изополя нормальных напряжений  $\sigma_y$  от постоянных нагрузок: а) по верхней плоскости плиты; б) по средней плоскости плиты; в) по нижней плоскости плиты



**Рис. 7.** Нормальные напряжения  $\sigma_y$  для сечений в поперечном направлении при температуре замыкания в холодный период года  $\Delta t_c = -25,96$  °С,  $\Delta t_w = 20,13$  °С для соотношения  $a/b = 300/100$

+7,883 МПа. Комбинированное воздействие оказывается наиболее неблагоприятным в левом ребре сечения б–б.

Длительная эксплуатация при суровых климатических условиях становится основным фактором нестабильности, выявляя уязвимость шпонок и торцевого бруса дис-

ка перекрытия. При многократных воздействиях низких температур на обогреваемые здания происходит усадка бетона в стенах и перекрытиях. Изменения температуры и влажности по вертикальным поверхностям шпонок имеют неравномерный характер. Торцы диска перекрытия, находящиеся под

воздействием атмосферных осадков из-за открытого расположения, становятся критическими точками, что приводит к проникновению влаги в бетон и объемным деформациям торцевого бруса под нагрузкой, что в итоге приводит к разрушению бетона и коррозии арматурных стержней.

На начальном этапе исследований расчетное сопротивление бетона сжатию  $R_{bt}$  принималось по I группе предельных состояний. Модуль деформации бетона принимался начальным, без учета ползучести и трещинообразования. В процессе численного моделирования отмечалось превышение нормальных напряжений в сечениях шпонок и торцевого бруса, относительно расчетного сопротивления бетона растяжению, что свидетельствует о возможности трещинообразования.

Численный анализ показал, что наибольшие напряжения возникают в местах соединения перфорации шпонками и могут превышать нормативные значения расчетного напряжения в 9,7 раз.

Из-за высокой инерционности железобетонного диска перекрытия при негативных температурах торец плиты многократно проходит зону перехода через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сечениях шпонок. Наблюдаемые процессы образования льда в структуре бетона ускоряют разрушение из-за особенностей агрегатного состояния воды. В связи с этим, необходимо ставить вопрос об опасности применения подобного рода конструктивного решения в жилищном строительстве без дополнительного исследования и уточнения методов расчета и конструирования.

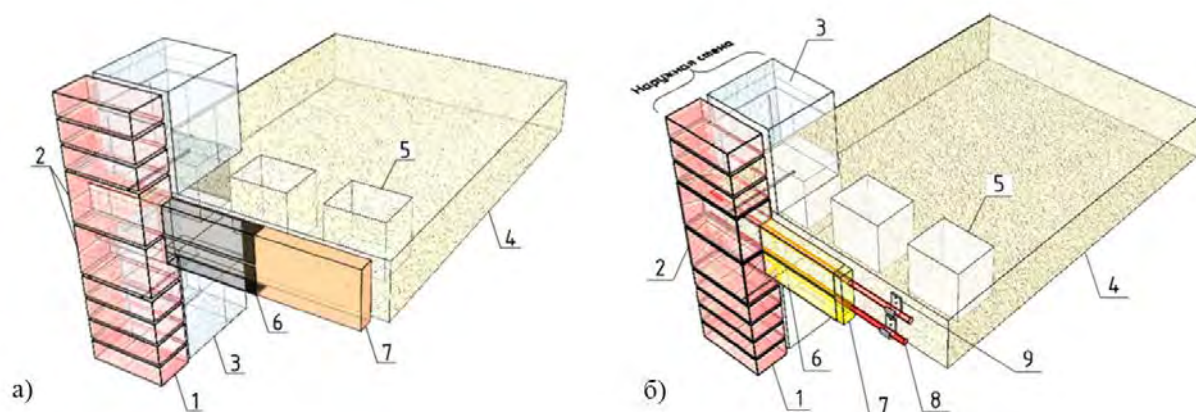
Предлагаются способы, позволяющие снизить степень влияния температурно-климатических воздействий в узле сопряжения диска перекрытия со стеной и в целом

повысить эксплуатационные качества в монолитных зданиях. Некоторые из таких разработок могут быть реализованы по одному из предложенных вариантов, рассмотренных на рис. 8. Причем предлагаемые инновационные конструктивные решения могут быть выполнены с использованием двух способов — пассивного (рис. 8, а) или активного (рис. 8, б). Оба способа позволяют повысить уровень теплозащиты монолитных зданий, за счет утепления торца диска перекрытия со стороны фасада.

Дополнительным способом, повышающим точность анализа НДС железобетона, может быть учет продольного армирования торцевого бруса и поперечного армирования шпонки. Нелинейная постановка расчета и учет ползучести [21] также позволит более детально проанализировать процессы, происходящие в материале под воздействием комбинированных нагрузок. Опуская промежуточные расчеты, связанные с определением температурных полей для рассматриваемых на рис. 8 технических решений, выявим степень их влияния на напряженно-деформированное состояние.

При выполнении термального расчета в ANSYS значения осредненных температур со стороны торца диска перекрытия для каждого из вариантов, рассмотренных на рис. 8, составили:  $t = -12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 8, а) и  $t = -1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 8, б).

На основании приведенных результатов можно сделать выводы, что применение предлагаемых методов утепления торцов перекрытия позволяет снизить значения нормальных напряжений практически в два раза, что положительно сказывается на общем напряженно-деформированном состоянии конструкции рассматриваемого узла.



**Рис. 8.** Устройство для утепления наружной стены здания: а) Г-образные элементы со слоем отражательной изоляции и теплоизоляционного материала;

б) Г-образные элементы, включающие слой отражательной изоляции, теплоизоляционный материал и саморегулируемые электронагревательные кабели.

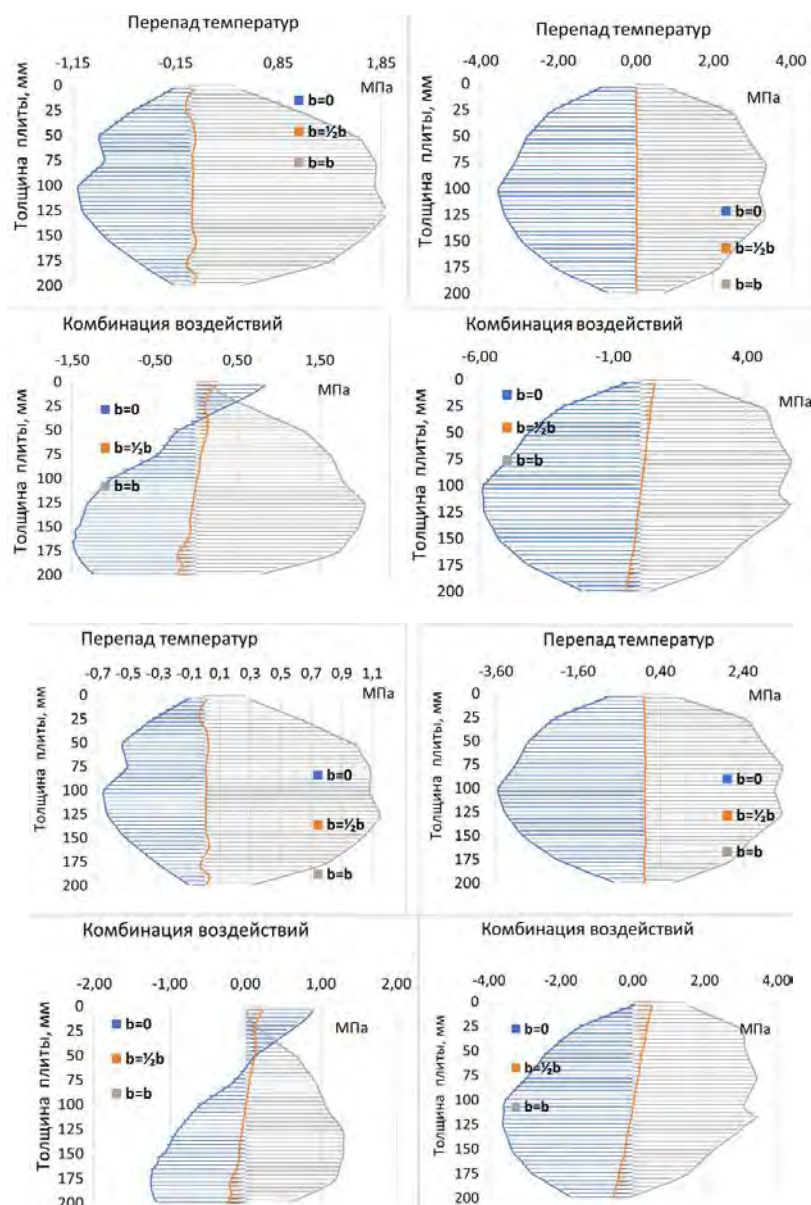
1 — наружный слой стены; 2 — слой стены, содержащий Г-образные (П-образные) элементы;

3 — слой из ячеистого бетона; 4 — железобетонный диск перекрытия; 5 — перфорация под термовкладыши; 6 — отражательный слой изоляции; 7 — теплоизоляционный материал;

8 — саморегулируемый электронагревательный кабель; 9 — элемент крепления

ТАБЛИЦА 2. Максимальные и минимальные значения напряжений в сечениях 2-2/8-8, 6-6/8-8 от постоянных и температурных нагрузок

Положение	Сечение	Напряжения от перепада температуры $t = -12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$		Напряжения от действия температуры $t = 1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$		Суммарные напряжения $t = -12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$		Суммарные напряжения $t = 1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$	
		$\sigma_{y,t}$		$\sigma_{y,t}$		$\sigma_{y,s}$		$\sigma_{y,s}$	
		$\sigma_{\min}'$ МПа	$\sigma_{\max}'$ МПа	$\sigma_{\min}'$ МПа	$\sigma_{\max}'$ МПа	$\sigma_{\min}'$ МПа	$\sigma_{\max}'$ МПа	$\sigma_{\min}'$ МПа	$\sigma_{\max}'$ МПа
Правое ребро	2-2/8-8	-1,109	-0,131	-0,671	<b>-0,079</b>	-1,509	<b>0,878</b>	<b>-5,909</b>	<b>-0,087</b>
Центр шпонки		-0,059	0,063	-0,036	0,038	-0,248	0,291	-0,61	0,623
Левое ребро		0,391	<b>1,916</b>	0,236	1,159	0,149	2,307	-0,026	6,358
Правое ребро	6-6/8-8	-5,909	-1,026	-3,573	<b>-0,620</b>	-1,274	-0,087	-3,62	0,319
Центр шпонки		-0,008	0,063	-0,005	0,038	-0,248	0,623	-0,613	0,598
Левое ребро		<b>0,837</b>	<b>5,584</b>	0,506	3,376	-0,026	<b>6,358</b>	<b>-0,357</b>	<b>4,150</b>



**Рис. 9.** Нормальные напряжения  $\sigma_y$  для сечений 2–2/8–8 и 6–6/8–8 по высоте элемента в поперечном направлении с учетом температурных нагрузок  $-12,246\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-1,2936\text{ }^{\circ}\text{C}$

### Заключение

Результаты моделирования температурно-климатических воздействий на напряженно-деформированное состояние участка диска перекрытия с перфорацией при соединении его с наружными стенами подчеркнули опасность применения существующих типов конструктивных решений. Исследование

выявило наиболее уязвимые участки перфорированных плит, которыми являются шпонки, т.к. они находятся в зоне влияния циклических температур. Установлено, что при комбинированном воздействии нагрузок, напряжения, определенные в линейной постановке в сечении железобетонной плиты, превышают нормативные значения.



Разницу в напряжениях предлагается компенсировать при помощи конструктивных мероприятий, описание которых приводится в ряде публикаций [2, 28–30].

Разработка рациональных конструктивных решений диска перекрытий с перфорацией позволит снизить концентрацию напряжений в зоне шпоночных соединений.

Подробное моделирование железобетонных элементов с учетом армирования, трещинообразования и нелинейной работы позволит еще более приблизить результаты расчетов к реальной работе конструкции.

Данные предложения позволяют решить принципиальные вопросы, связанные с повышением эксплуатационных качеств гражданских зданий, в том числе высотных и повышенной этажности.

### Библиографический список

1. Волкова О. Е. Монолитное домостроение в современном строительстве / О. Е. Волкова, К. А. Сидоренко // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 146–149.
2. Kuznetsov A. V. Energy Efficient Design Solution for the Interface Node Between the Floor Slab and the Wall / A. V. Kuznetsov, A. M. Demin // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 года. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 799–807. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4-87.
3. Kuznetsov A. V., Zimin S. S. Temperature stresses in the perforated overlap disc / A. V. Kuznetsov, S. S. Zimin // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 3 (101). P. 10103. DOI: 10.4123.
4. Сидоров В. Н., Примкулов А. М. Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности с переменными теплофизическими параметрами среды / В. Н. Сидоров // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18, № 5. С. 685–696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696.
5. Лебедева А. В. Влияние температурно-климатических воздействий на напряженно-деформированное состояние монолитного железобетонного каркаса здания / А. В. Лебедева, С. А. Тумаков // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 4 (11). С. 9–14.
6. Сотникова О. А., Целярицкая М. И., Пашенко Ю. О. Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже. Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. № 26 (3). С. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-34.
7. Merita G., Flogerta K., Klodjan Xh. Study of thermal performance of prefabricate large panel buildings // Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering — 2CroCEE. DOI: 10.5592/CO/2CroCEE.2023.63.
8. Ищук М. К., Ищук Е. М., Айзятуллин Х. А. и др. Дефекты наружных стен с лицевым слоем из пустотелого кирпича // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 29–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.29-35.
9. Зимин С. С. Напряженно-деформированное состояние кирпичной облицовки в области сопряжения с плитами перекрытия при отсутствии деформационного шва / С. С. Зимин, А. Ю. Сударь, Е. И. Васильева // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8 (71). С. 13–21. DOI: 10.18720/CUBS.71.2. EDN CXJFDV.
10. Орлович Р. Б. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями / Р. Б. Орлович, В. Н. Деркач, С. С. Зимин // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 30–37. DOI 10.5862/MCE.60.4.
11. Деркач В. Н., Горшков А. С., Орлович Р. Б. Проблемы трещиностойкости стенового заполнения каркасных зданий из ячеисто-бетонных блоков / В. Н. Деркач, А. С. Горшков, Р. Б. Орлович // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-52-56. EDN TBACNL.
12. Luigi Coppola, Beretta Silvia, Bignozzi Chiara Maria, et al. The Improvement of Durability of Reinforced Concretes for Sustainable Structures :

A Review on Different Approaches. April 2022 — Materials 15 (8): 2728. DOI: 10.3390/ma15082728.

13. Tamrazyan A. G. The influence of depth of tensile concrete deterioration on the load bearing strength and deflections of corrosion-damaged floor slabs / A. G. Tamrazyan, A. A. Minasyan // VI integration, partnership and innovation in construction science and education. Matec. 2018. Vol. 251, 02012. 6 p.

14. Желдаков Д. Ю., Пономарев О. И., Минасян А. А. и др. Оценка долговечности кирпичных и каменных конструкций при проведении инженерных изысканий // Вестник НИЦ Строительство. 2023. № 1 (36). С. 27–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40.

15. Kramarchuk A., Pnytskyu B., Kopyika N. Ensuring the Load-Bearing Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slab Damaged by Cracks in the Compressed Zone // Proceedings of EcoComfort 2022/ January 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6-21.

16. Сотникова О. А. Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже / О. А. Сотникова, М. И. Целярицкая, Ю. О. Пашенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26, № 3. С. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35.

17. Томаков В. И., Томаков М. В., Пахомова Е. Г. и др. Анализ причин обрушения опалубочных систем в строящихся зданиях при устройстве монолитных перекрытий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 79–92. EDN PNTULV.

18. Тихонов И. Н., Козелков М. М. Расчет и проектирование железобетонных монолитных перекрытий зданий с учетом защиты от прогрессирующего обрушения // Бетон и железобетон. 2009. № 3. С. 2–8.

19. Колчунов В. И. Напряженно-деформированное состояние нагруженного и коррозионно-поврежденного железобетона в зоне наклонных трещин / В. И. Колчунов, М. С. Губанова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. № 2 (42). С. 11–22.

20. Яров В. А. Исследования напряженно-деформированного состояния монолитных перекрытий, выполненных с теплоизолирующими вставками / В. А. Яров, А. А. Коянкин, К. В. Скрипальщиков // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 107–112.

21. Корсун В. И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий. Макеевка: ДонГАСА, 2003. 153 с.

22. Довженко О. А. Эффективные шпоночные соединения многпустотных плит перекрытий со стенами в современном крупнопанельном домостроении / О. А. Довженко, В. В. Погребной, Л. В. Карабаш // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 2. С. 146–156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156. EDN YNQSHZ.

23. Колчунов В. И., Московцева В. С., Бушова О. Б. и др. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения // Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 35–44. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44.

24. Альхименко А. И. Влияние температуры замыкания при возведении на напряжения в несущих конструкциях / А. И. Альхименко, А. И. Снегирев // Инженерно-строительный журнал. 2008. № 2 (2). С. 8–16.

25. Ерофеев В. Т., Ельчищева Т. Ф., Левцев А. П. и др. Термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций при переменном тепловом потоке // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 10. С. 4–13. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13.

26. Варламов А. А., Шишлонов Е. А., Ткач Е. Н. и др. Закономерности связи напряжений и деформаций в бетоне // Academy. 2016. № 2 (5). С. 7–16.

27. Barabanshchikov Iu. G. The Influence of Concrete Composition on the Ratio of Strength to Elastic Modulus as a Criterion of Crack Resistance / Iu. G. Barabanshchikov, T. H. Pham // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. No 4 (97). P. 9704. DOI: 10.4123/CUBS.97.4.

28. Кузнецов А. В. Патент на полезную модель № 199000 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/78. Устройство для повышения теплозащитных качеств наружной стены здания: № 2020111631: заявл. 19.03.2020; опубл. 06.08.2020 / А. В. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

29. Кузнецов А. В. Патент на полезную модель № 199001 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/78. Устройство для утепления наружной стены здания: № 2020111623: заявл. 19.03.2020; опубл. 06.08.2020 / А. В. Кузнецов, М. В. Калущин, А. М. Демин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

30. Кузнецов А. В. Узлы сопряжения диска перекрытия с ограждающими стеновыми конструк-

циями в монолитном домостроении: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.1 / Кузнецов Анатолий Всеволодович [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»; Диссовет 24.2.380.01 (Д 212.223.03)]. Санкт-Петербург, 2022. 206 с.

Дата поступления: 21.01.2024

Решение о публикации: 24.02.2024

#### Контактная информация:

БЕЛАШ Татьяна Александровна — докт. техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», советник РААСН; [belashta@mail.ru](mailto:belashta@mail.ru)

КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; [akuznetsov@pgups.ru](mailto:akuznetsov@pgups.ru)

ВОЛОДЧЕНКО Дина Геннадьевна — аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; [dina.volod@yandex.ru](mailto:dina.volod@yandex.ru)

## Analysis of the stress-strain state of nodal joints of high-rise buildings taking into account climatic influences

T. A. Belash<sup>1</sup>, A. V. Kuznetsov<sup>2</sup>, D. G. Volodchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC Research Center of Construction, 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russia

<sup>2</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Belash T. A., Kuznetsov A. V., Volodchenko D. G. Analysis of the stress-strain state of nodal joints of high-rise buildings taking into account climatic influences // Proceedings of Petersburg Transport University, 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 85–102. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-85-102*

### Abstract

**Purpose:** to analyze the design solutions of the junctions of floors with external walls in buildings erected using monolithic technology. To identify defects and damages that occur on facades and overlaps with perforations for thermal pads during construction and operation. To investigate by numerical methods the stress-strain state of the overlap disk at the junction with the outer wall, taking into account temperature influences. **Materials and methods:** the standard version of the nodal connection of a monolithic building of various storeys is considered. The fragment of the junction joint of the overlap disk with the wall was modeled in the Ansys and SCAD software complexes. The model consisted of an anisotropic material — concrete and reinforcement rods included in it. The behavior of the stress-strain state under various temperature influences was studied. **Results:** numerically, taking into account geometric parameters

and temperature loads, the patterns affecting the nature of changes in the values of normal stresses in the characteristic sections of the perforated plate are revealed and the existing types of design solutions are evaluated. The locations of stress concentration zones and their impact on performance are determined. **Practical significance:** it is shown that the most dangerous cross-section in perforated discs of overlaps takes place at the key joints. It is determined that vulnerability in such compounds is caused by the influence of alternating cyclic temperatures. Patterns leading to an increase in normal stresses at stress concentration sites have been established. Fundamentally new design solutions have been proposed, protected by utility model patents, which allow to reduce stress values and thereby ensure higher performance in monolithic buildings, including high-rise ones.

**Keywords:** finite element method, reinforced concrete monolithic slabs, numerical calculation methods, temperature and climatic effects.

## References

1. Volkova O. E. Monolitnoe domostroenie v sovremennom stroitel'stve / O. E. Volkova, K. A. Sidorenko // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2021. T. 1. S. 146–149. (In Russian)
2. Kuznetsov A. V. Energy Efficient Design Solution for the Interface Node Between the Floor Slab and the Wall / A. V. Kuznetsov, A. M. Demin // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021, Novosibirsk, May 11–14, 2021. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 799–807. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4-87. (In Russian)
3. Kuznetsov A. V., Zimin S. S. Temperature stresses in the perforated overlap disc // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 3 (101). P. 10103. DOI: 10.4123.
4. Sidorov V. N., Primkulov A. M. Chislennno-analiticheskoe reshenie nestacionarnoj zadachi teploprovodnosti s peremennymi teplofizicheskimi parametrami sredi // Vestnik MGSU. 2023. T. 18, № 5. S. 685–696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685–696. (In Russian)
5. Lebedeva A. V. Vlijanie temperaturno-klimaticheskikh vozdeystvij na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie monolitnogo zhelezobonnogo karkasa zdaniya / A. V. Lebedeva, S. A. Tumakov // Zhilishhnoe hozjajstvo i kommunal'naja infrastruktura. 2019. № 4 (11). S. 9–14. (In Russian)
6. Sotnikova O. A., Celjarickaja M. I., Pashhenko Ju. O. Analiz "mostikov holoda" s cel'ju vyjavlenija nedostatkov monolitnogo domostroenija v g. Voronezhe. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2022. T. 26, № 3. S. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-34. (In Russian)
7. Merita G., Flogerta K., Klodjan Xh. Study of thermal performance of prefabricate large panel buildings // Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering — 2CroCEE. DOI: 10.5592/CO/2CroCEE.2023.63.
8. Ishhuk M. K., Ishhuk E. M., Ajzjatullin H. A. i dr. Defekty naruzhnyh sten s licevym sloem iz pustotelogo kirpicha // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. № 4. S. 29–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.29-35. (In Russian)
9. Zimin S. S. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie kirpichnoj oblicovki v oblasti soprjazhenija s plitami perekrytija pri otsutstvii deformacionnogo shva / S. S. Zimin, A. Ju. Sudar', E. I. Vasil'eva // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2018. № 8 (71). S. 13–21. DOI: 10.18720/CUBS.71.2. EDN CXJFDV. (In Russian)
10. Orlovich R. B. Povrezhdenie kamennogo licevogo sloja v zone soprjazhenija s zhelezobonnymi perekrytijami / R. B. Orlovich, V. N. Derkach, S. S. Zimin // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2015. № 8 (60). S. 30–37. DOI 10.5862/MCE.60.4. (In Russian)
11. Derkach V. N., Gorshkov A. S., Orlovich R. B. Problemy treshhinostjokosti stenovogo zapolnenija karkasnyh zdaniy iz jacheisto-betonnyh blokov // Stroitel'nye materialy. 2019. № 3. S. 52–56. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-52-56. EDN TBACNL. (In Russian)
12. Luigi Coppola, Beretta Silvia, Bignozzi Chiara Maria, et al. The Improvement of Durability of Rein-

forced Concretes for Sustainable Structures: A Review on Different Approaches. April 2022—Materials 15(8): 2728. DOI: 10.3390/ma15082728.

13. Tamrazyan A. G. The influence of depth of tensile concrete deterioration on the load bearing strength and deflections of corrosion-damaged floor slabs /A.G. Tamrazyan, A. A. Minasyan // VI Integration, partnership and innovation in construction science and education. Matec. 2018. Vol. 251, 02012. 6 p.

14. Zheldakov D. Ju., Ponomarev O. I., Minasjan A. A. i dr. Ocenka dolgovechnosti kirpichnyh i kamennyh konstrukcij pri provedenii inzhenernyh izyskanij // Vestnik NIC Stroitel'stvo. 2023. № 1 (36). S. 27–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. (In Russian)

15. Kramarchuk A., Ilnytsky B., Kopia N. Ensuring the Load-Bearing Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slab Damaged by Cracks in the Compressed Zone // Proceedings of EcoComfort 2022/ January 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6-21.

16. Sotnikova O. A. Analiz “mostikov holoda” s cel'ju vyjavlenija nedostatkov monolitnogo domostroenija v g. Voronezhe / O. A. Sotnikova, M. I. Celjarickaja, Ju. O. Pashhenko // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2022. T. 26, № 3. S. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35. (In Russian)

17. Tomakov V. I., Tomakov M. V., Pahomova E. G. i dr. Analiz prichin obrushenija opalubochnyh sistem v strojshhihsja zdaniyah pri ustrojstve monolitnyh perekrytij // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. 2018. T. 8, № 4 (29). S. 79–92. EDN PNTULV. (In Russian)

18. Tihonov I. N., Kozelkov M. M. Raschet i konstruirovanie zhelezobetonnyh monolitnyh perekrytij zdaniy s uchetom zashhity ot progressirujushhego obrushenija / I. N. Tihonov, M. M. Kozelkov // Beton i zhelezobeton. 2009. № 3. S. 2–8. (In Russian)

19. Kolchunov V. I. Naprjazhenno-deformirovanoe sostojanie nagruzhenno i korrozionno-povrezhdennogo zhelezobetona v zone naklonnyh treshhin / V. I. Kolchunov, M. S. Gubanova // Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. 2016. № 2 (42). S. 11–22. (In Russian)

20. Jarov V. A. Issledovanija naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija monolitnyh perekrytij, vypolnennyh s teploizolirujushhimi vstavkami / V. A. Jarov, A. A. Kojankin, K. V. Skripal'shhikov // Vestnik MGSU. 2010. № 1. S. 107–112. (In Russian)

21. Korsun V. I. Naprjazhenno-deformirovanoe sostojanie zhelezobetonnyh konstrukcij v uslovijah temperaturnyh vozdeystvij. Makeevka: DonGASA, 2003. 153 s. (In Russian)

22. Dovzhenko O. A. Jeffektivnye shponochnye soedinenija mnogopustotnyh plit perekrytij so stenami v sovremennom krupnopanel'nom domostroenii / O. A. Dovzhenko, V. V. Pogreboj, L. V. Karabash // Nauka i tehnika. 2018. T. 17, № 2. S. 146–156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156. EDN YN-QSHZ. (In Russian)

23. Kolchunov V. I., Moskovceva V. S., Bushova O. B. i dr. Raschetnyj analiz sposobov zashhity monolitnyh karkasov mnogojetaznyh zdaniy s ploskimi perekrytijami ot progressirujushhego obrushenija // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2021. № 4 (96). S. 35–44. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44. (In Russian)

24. Al'himenko A. I. Vlijanie temperatury zamykanija pri vozvedenii na naprjazhenija v nesushhih konstrukcijah / A. I. Al'himenko, A. I. Snegirev // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2008. № 2 (2). S. 8–16. (In Russian)

25. Erofeev V. T., El'chishheva T. F., Levcev A. P. i dr. Termicheskoe soprotivlenie naruzhnyh ograzhdajushhih konstrukcij pri peremennom teplovom potoke // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. № 10. S. 4–13. DOI: 10.33622/0869–7019.2022.10.04–13. (In Russian)

26. Varlamov A. A., Shishlonov E. A., Tkach E. N. i dr. Zakonomernosti svjazi naprjazhenij i deformacij v betone // Academy. 2016. № 2 (5). S. 7–16. (In Russian)

27. Barabanshchikov Iu. G. The Influence of Concrete Composition on the Ratio of Strength to Elastic Modulus as a Criterion of Crack Resistance / Iu. G. Barabanshchikov, T. H. Pham // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. No. 4 (97). P. 9704. DOI: 10.4123/CUBS.97.4.

28. Kuznecov A. V. Patent na poleznuju model' № 199000 U1 Rossijskaja Federacija, MPK E04B 1/78. Ustrojstvo dlja povyshenija teplozashhitnyh kachestv naruzhnoj steny zdanija: № 2020111631: zajavl. 19.03.2020: opubl. 06.08.2020 / A. V. Kuznecov; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I". (In Russian)

29. Kuznecov A. V. Patent na poleznuju model' № 199001 U1 Rossijskaja Federacija, MPK E04B 1/78. Ustrojstvo dlja uteplenija naruzhnoj steny zdanija: № 2020111623: zajavl. 19.03.2020: opubl. 06.08.2020 / A. V. Kuznecov, M. V. Kalushin, A. M. Demin; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I". (In Russian)

30. Kuznecov A. V. Uzly soprjazhenija diska perekrytija s ograzhdajushhimi stenovymi konstrukcijami v monolitnom domostroenii: dis. ... kand. tehn. nauk: 2.1.1 / Kuznecov Anatolij Vsevolodovich [Mesto zashchity: FGBOU VO "Sankt-Peterburgskij gosudarst-

vennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet"; Dissovet 24.2.380.01 (D 212.223.03)]. Sankt-Peterburg, 2022. 206 s. (In Russian)

Received: 21.01.2024

Accepted: 24.02.2024

**Author's information:**

Tatyana A. BELASH — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Building Structures, Structures and Materials, Advisor to the RAASN; Scopus 7801647643, WoS ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794, SPIN: 5217-7177, AuthorID: 66498; belashta@mail.ru

Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; Scopus 57205441909, WoS ResearcherID: HPH-1274-2023, ORCID: 0000-0002-3809-399X, SPIN: 8756-5314, AuthorID: 659654; akuznetsov@pgups.ru

Dina G. VOLODCHENKO — Postgraduate Student of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; dina.volod@yandex.ru

УДК 628.14

## Расчет времени охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией в условиях отрицательных температур

**В. Ф. Лапшин**

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

**Для цитирования:** Лапшин В. Ф. Расчет времени охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией в условиях отрицательных температур // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 103–112. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-103-112

### Аннотация

**Цель:** объекты транспортной инфраструктуры включают в себя разнообразные системы водоснабжения. В случае аварийной ситуации, после прекращения движения воды в трубопроводе, сначала происходит ее охлаждение, а затем возникает опасность замерзания и разрушения водоводов. Настоящая работа посвящена расчету времени охлаждения воды в надземном водоводе с теплоизоляцией от заданного значения температуры в начальном состоянии до температуры замерзания. **Методы:** при построении математической модели процесса охлаждения воды используется подход, основанный на осреднении уравнений гидродинамики по объему воды в трубопроводе и осреднении уравнений теплопроводности в стенке трубопровода и в слое теплоизолятора по полярному углу. Для получения квазистационарной формы уравнений используется сравнительный анализ скоростей протекания тепловых процессов в различных слоях водовода. **Результаты:** сформулирована новая математическая модель остывания водовода — модель средних температур. Обоснована применимость квазистационарной формы уравнений модели, и найдено ее аналитическое решение. Получены явные формулы для времени остывания водовода как функции его параметров. Выполнены расчеты времени остывания в широком диапазоне параметров. Результаты модельных расчетов сравниваются с расчетами по традиционным полуэмпирическим формулам. **Практическая значимость:** полученные в работе формулы могут быть использованы для оценки времени охлаждения воды в надземном водоводе с теплоизоляцией до температуры замерзания в случае, когда температура внешней среды понижается до отрицательных значений.

**Ключевые слова:** надземный водовод, теплообмен, время охлаждения, математическое моделирование, квазистационарное приближение.

### Введение

Важной частью объектов транспортной инфраструктуры являются системы водоснабжения. В северных широтах, в условиях вечной мерзлоты, надземная прокладка трубопроводов оказывается наиболее рациональной [1–2]. Вместе с тем эксплуатация водоводов при отрицательной температуре окружающей среды связана с опасностью их замерзания и разрушения. В связи с этим

процессам охлаждения воды и последующего внутритрубного обледенения посвящено большое число как экспериментальных [3–8], так и теоретических работ [8–12]. В настоящей работе рассматривается процесс охлаждения воды в надземном трубопроводе с теплоизоляцией в случае прекращения ее движения в условиях отрицательной температуры окружающей среды. Похожие задачи

рассматривались в [8–10]. Однако в работах [8, 9] на трубопроводе отсутствовала теплоизоляция, что существенно сказывалось на скорости процесса теплообмена воды с окружающей атмосферой. В работе [10] вода в процессе остывания считалась неподвижной, и, соответственно, предполагалось, что основным механизмом теплообмена является теплопроводность. В результате этого время остывания оказывалось существенно завышенным, поскольку при наличии градиента температуры в жидкости реализуется более эффективный конвективный механизм теплообмена.

В предлагаемой работе анализируются физические процессы, протекающие в процессе остывания водовода. Математическая модель процесса охлаждения строится методом осреднения уравнений гидродинамики и теплопроводности без каких-либо предположений о характере движения воды в трубопроводе. Обосновывается возможность использования квазистационарного приближения для получения явных соотношений для расчетов времени охлаждения. Определяется область значений параметров задачи, при которых это приближение применимо. Результаты модельных расчетов сравниваются со значениями, полученными по эмпирическим формулам, использующим теорию подобия.

### Модель средних температур

В работе рассматривается процесс остывания неподвижной воды в аксиально-симметричном трубопроводе надземной прокладки с теплоизоляцией. Предполагается, что в исходном состоянии температура всех его элементов (воды, стенок трубы и теплоизолятора) известна и равна заданному значению  $T_0$ . В начальный момент времени

$t = 0$  температура внешней среды мгновенно понижается до значения  $T_{ex}$ , меньшего, чем температура фазового перехода вода – лед  $T_{ph}$ , и далее, в процессе остывания водовода, считается постоянной.

Приступая к выводу уравнения для средней температуры, прежде всего отметим, что охлаждение воды происходит из-за понижения температуры поверхности трубопровода. Это означает, что температура воды  $T_w$  внутри трубопровода в точках, находящихся на одинаковом уровне, будет различной. В этом случае для жидкости, находящейся в поле силы тяжести, состояние механического равновесия невозможно [13]. Отсутствие механического равновесия приводит к возникновению свободной конвекции – внутренних течений, которые стремятся перемешать жидкость и выровнять температуру по ее объему. Такие течения воды происходят достаточно медленно, с гипозвуковыми скоростями. По этой причине нагрев воды за счет вязкости ничтожно мал по сравнению с потерями тепла при охлаждении водовода. Уравнение переноса энергии при конвективном теплообмене в трубопроводе имеет в таком случае вид [13]:

$$\rho_w c_1 \left( \frac{\partial T_w}{\partial t} + \vec{v} \text{grad} T_w \right) = \text{div}(\lambda_1 \text{grad} T_w). \quad (1)$$

Здесь  $\rho_w$ ,  $c_1$  и  $\lambda_1$  — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности воды,  $t$  — время. Пространственная неравномерность охлаждения воды приводит к неравномерному распределению температур  $T_p$  в стенках трубопровода и  $T_i$  в слое теплоизолятора. Уравнения переноса энергии для них будут иметь вид:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_p}{\partial t} = \text{div}(\lambda_2 \text{grad} T_p), \quad (2)$$



$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_i}{\partial t} = \text{div}(\lambda_3 \text{grad} T_i). \quad (3)$$

Здесь  $\rho_2, \rho_3, c_2, c_3, \lambda_2, \lambda_3$  — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала стенки трубопровода и теплоизолятора. Значения этих величин, а также  $c_1$  и  $\lambda_1$  будем считать далее постоянными. Уравнение (1) содержит скорость движения воды  $\vec{v}$  и для его решения необходимо привлечь уравнения непрерывности и Навье — Стокса. В результате этого решение системы уравнений (1)–(3) становится крайне сложной и трудоемкой задачей. Вместе с тем при решении частной задачи по определению времени охлаждения воды в трубопроводе достаточно, очевидно, следить за изменением значения ее средней по объему температуры. Уравнения (1)–(3) являются при этом избыточно детализированными. Введем средние по объему значения температуры  $T_1$  и плотности  $\rho_1$  воды по формулам:

$$T_1(t) = \frac{1}{V_1} \iiint_{V_1} T_w dV, \quad \rho_1(t) = \frac{1}{V_1} \iiint_{V_1} \rho_w dV.$$

Здесь  $V_1$  — объем воды, заключенный в участке трубопровода единичной длины. Средние по полярному углу значения температур стенки трубопровода  $T_2$  и теплоизолятора  $T_3$  определим по формулам:

$$\begin{aligned} T_2(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_p(r, \varphi, t) d\varphi, \\ T_3(r, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_i(r, \varphi, t) d\varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения для средних величин  $T_2$  и  $T_3$  получаются усреднением (2) и (3) по полярному углу в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$ , ось  $Z$  которой совпадает с осью трубопровода:

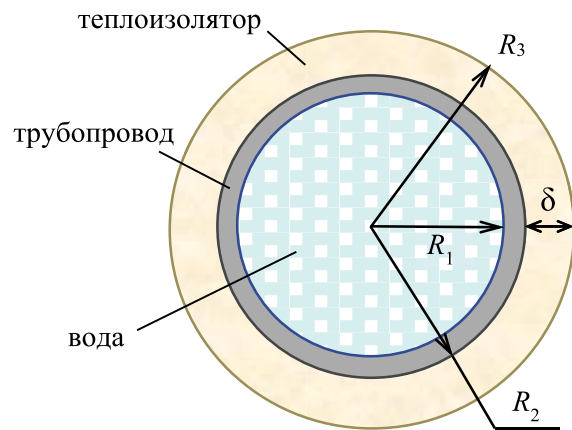
$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad (5)$$

$R_1 < r < R_2$ , для стенки трубы,

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad (6)$$

$R_2 < r < R_3$ , для теплоизолятора.

Здесь  $r$  — радиальная переменная,  $R_1$  и  $R_2$  — внутренний и наружный радиусы стенки трубопровода,  $R_3$  — внешний радиус теплоизоляции (рис. 1).



**Рис. 1.** Поперечное сечение водовода:

$\delta$  — толщина слоя теплоизоляции;  
 $R_1$  и  $R_2$  — внутренний и наружный радиусы трубы;  $R_3$  — внешний радиус водовода с теплоизоляцией

Чтобы получить уравнение для средней температуры воды, выполним следующие преобразования. Производную по времени от произведения  $\rho_w$  и  $T_w$  представим в виде:

$$c_1 \frac{\partial(\rho_w T_w)}{\partial t} = c_1 T_w \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + c_1 \rho_w \frac{\partial T_w}{\partial t}.$$

В правой части заменим производную по времени в первом слагаемом с помощью

уравнения непрерывности, а во втором — с помощью уравнения (1). В результате получим:

$$c_1 \frac{\partial(\rho_w T_w)}{\partial t} = -c_1 \operatorname{div}(\rho_w T_w \vec{v}) + \operatorname{div}(\lambda_1 \operatorname{grad} T_w).$$

Проинтегрируем последнее соотношение по объему  $V_1$  и преобразуем с помощью теоремы Гаусса — Остроградского объемные интегралы в правой части в интегралы по поверхности этого объема. Учтем, что первый интеграл в правой части обратится в нуль, поскольку скорость жидкости на боковой поверхности  $V_1$  равна нулю, а поток через основания цилиндра  $V_1$  отсутствует. В результате получаем:

$$c_1 \frac{d(\rho_1 T_1)}{dt} = \frac{1}{V_1} \iint_{S_1} \lambda_1 \operatorname{grad} T_w d\vec{S}.$$

Здесь  $S_1$  — боковая поверхность цилиндра  $V_1$ . Далее воспользуемся условием непрерывности потока тепла через поверхность  $S_1$  и определением (4):

$$\iint_{S_1} \lambda_1 \operatorname{grad} T_w d\vec{S} = \iint_{S_1} \lambda_2 \operatorname{grad} T_p d\vec{S} = S_1 \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1}.$$

Теперь с учетом того, что  $S_1/V_1 = 2/R_1$ , получаем окончательное уравнение для средней температуры воды в трубопроводе:

$$c_1 \rho_1 (1 - \beta T_1) \frac{dT_1}{dt} = \frac{2}{R_1} \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1}. \quad (7)$$

Здесь  $\beta = -(\partial \rho_1 / \partial T_1)_p / \rho_1$  — температурный коэффициент расширения воды. К уравнениям (5)–(7) добавим начальные условия

$$T_1(0) = T_2(r, 0) = T_3(r, 0) = T_0 \quad (8)$$

и традиционные граничные условия, выражающие равенство температур и потоков тепла на границах слоев водовода:

$$\begin{aligned} T_1(t) &= T_2(R_1, t), \\ T_2(R_2, t) &= T_3(R_2, t), \\ T_3(R_3, t) &= T_{ex}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_2} = \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=R_2}. \quad (10)$$

Уравнения (5)–(7) вместе с условиями (8)–(10) составляют модель средних температур для процесса остывания водовода. Отметим, что уравнение (7) получено без каких-либо предположений о характере движения воды в трубопроводе. Кроме того, отметим здесь, что на внешней поверхности водовода вместо традиционного условия в форме закона теплообмена Ньютона используется равенство температур  $T_{ex} = T_3(R_3, t)$ . Как показано в [12, 14], погрешность, вносимая такой заменой, при наличии теплоизоляции не превышает погрешности, обусловленной неопределенностью условий теплообмена на поверхности водовода (например, скорости и направления ветра).

### Квазистационарное приближение

Оценим характерное время  $t_c^*$  остывания цилиндрического столба воды единичной длины радиусом  $R_1$  от начальной температуры  $T_0$  до температуры замерзания  $T_{ph}$ . С этой целью приравняем количество теплоты, которое необходимо для этого отвести от воды, к теплу, отводимому от поверхности столба воды за счет теплопроводности:

$$\pi R_1^2 c_1 \rho_1 (T_0 - T_{ph}) = -2\pi R_1 \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{R_1} t_c^*.$$

Учтем, что

$$-\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1} \approx -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_2} = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=R_2} \approx \lambda_3 \frac{T_1 - T_{ex}}{\delta}.$$

Тогда получаем:

$$t_c^* = \frac{c_1 \rho_1 R_1 (T_0 - T_{ph}) \delta}{2 \lambda_3 (T_1 - T_{ex})}.$$

Сравним теперь характерное время выравнивания температуры в слое теплоизолятора вследствие теплопроводности  $t_3^* = \delta^2 \rho_3 c_3 / \pi^2 \lambda_3$  [15] с величиной  $t_c^*$ . Для отношений характерных времен получаем соотношение:

$$\varepsilon = \frac{t_3^*}{t_c^*} = \frac{2 \rho_3 c_3 \delta}{\pi^2 \rho c_1 R_1} \frac{T_1 - T_{ex}}{T_0 - T_{ph}}.$$

Используем здесь значения  $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_1 = 4180 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $\rho_3 = 100 \text{ кг/м}^3$  и  $c_3 = 840 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  из [16]. Тогда, для характерных значений  $\delta = 0,1 \text{ м}$ ,  $R_1 = 0,2 \text{ м}$ ,  $T_0 - T_{ph} = 5 \text{ К}$ ,  $T_0 - T_{ex} = 25 \text{ К}$ , с учетом того, что  $T_1 < T_0$ , получаем  $\varepsilon < 0,025$ . Как видим, время выравнивания температуры в слое теплоизолятора намного меньше времени остывания воды. Время выравнивания температуры в тонкой стенке трубопровода, очевидно, еще меньше. Таким образом, в каждый момент времени благодаря теплопроводности в стенке трубопровода и в слое теплоизолятора успевает установиться радиальное распределение температуры, которое соответствует стационарному распределению с заданным значением температуры воды. Это позволяет использовать для определения времени остывания водовода квазистационарную форму модели средних температур:

$$c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{2}{R_1} \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1}, \quad (11) \quad \text{где}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad (12)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0, \quad R_2 < r < R_3. \quad (13)$$

В уравнении (11) пренебрегается величиной  $\beta T_1$ , поскольку в диапазоне температур от  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  она не превышает по модулю  $0,017$  [17]. Начальным условием для (11) и граничными условиями для (12)–(13) остаются соотношения (8)–(10). Общее решение уравнений (12)–(13) имеет вид:

$$T_i(r) = c_{i1} \ln(r) + c_{i2}, \quad i = 2, 3. \quad (14)$$

После подстановки (14) в граничные условия (9)–(10) получаем систему из четырех линейных относительно коэффициентов  $c_{i1}$  и  $c_{i2}$  уравнений:

$$\begin{aligned} c_{21} \ln R_1 + c_{22} &= T_1 \\ c_{21} \ln R_2 + c_{22} &= c_{31} \ln R_2 + c_{32} \\ \lambda_2 c_{21} &= \lambda_3 c_{31} \\ c_{31} \ln R_3 + c_{32} &= T_{ex} \end{aligned}$$

Решение линейной системы имеет громоздкий вид. Приведем здесь выражение для коэффициента  $c_{21}$ , который необходим для решения уравнения (11):

$$c_{21} = - \frac{\lambda_3 (T_1 - T_{ex})}{\lambda_2 \ln \frac{R_3}{R_2} + \lambda_3 \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (15)$$

После подстановки (15) в (11) получаем дифференциальное уравнение для  $T_1$ :

$$\frac{dT_1}{dt} = -A(T_1 - T_{ex}),$$

$$A = \frac{2 \lambda_3}{\rho_1 c_1 R_1^2 \left( \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \ln \frac{R_2}{R_1} \right)}. \quad (16)$$

Решение этого уравнения, с учетом начального условия  $T_1(0) = T_0$ , имеет вид:

$$T_1(t) = T_{ex} + (T_0 - T_{ex}) \exp(-At). \quad (17)$$

Время охлаждения воды  $t_c$  находится из условия  $T_1(t_c) = T_{ph}$ . Используя (17), получаем, что время охлаждения воды в трубопроводе от начальной температуры  $T_0$  до температуры замерзания  $T_{ph}$  при температуре окружающей среды  $T_{ex}$  задается формулой:

$$t_c = \frac{\rho_1 c_1 R_1^2}{2\lambda_3} \left[ \ln\left(1 + \frac{\delta}{R_2}\right) + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \ln\left(1 + \frac{\Delta R}{R_1}\right) \right] \ln\left(\frac{T_0 - T_{ex}}{T_{ph} - T_{ex}}\right). \quad (18).$$

Здесь  $\Delta R = R_2 - R_1$  — толщина стенки трубопровода. Отметим здесь также, что температура наружной поверхности водовода в реальных условиях всегда несколько выше, чем температура окружающей среды. Это приводит к тому, что значения времени охлаждения (18), полученные при использовании условия (9), всегда будут несколько меньше, чем в действительности.

### Результаты вычислений и обсуждение

Основные особенности процесса охлаждения водовода отражены в соотношении (18). Прежде всего отметим, что при малых толщинах теплоизоляции, когда  $\delta/R_2 \ll 1$ , время охлаждения прямо пропорционально произведению радиуса трубопровода  $R_1$  и  $\delta$ :  $t_c \sim \delta R_1$ . После того как толщина теплоизоляции  $\delta$  сравнивается по величине с  $R_1$ , зависимость от  $\delta$  становится логарифмической. Аналогичная зависимость имеет место и для температуры. При низкой наружной температуре  $T_{ex}$ , когда  $\varepsilon_T = (T_0 - T_{ph}) / (T_{ph} - T_{ex}) \ll 1$ , время охлаждения  $t_c \sim \varepsilon_T$ . При значениях отношения  $\varepsilon_T$  порядка или более единицы зависимость от температуры становится логарифмической:  $t_c \sim \ln(1 + \varepsilon_T)$ . Отметим здесь также, что для металлического трубопровода отношение коэффициентов теплопроводности

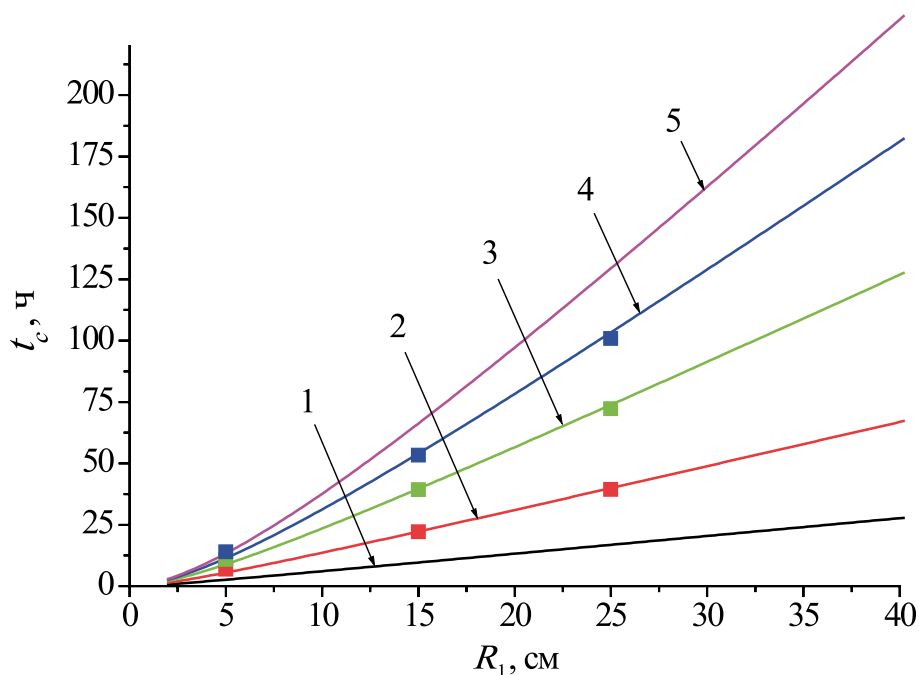
$\lambda_3 / \lambda_2 \ll 1$  и вторым слагаемым в квадратных скобках в (18) можно пренебречь.

Результаты вычислений времени охлаждения воды  $t_c$  по формуле (18) в зависимости от радиуса трубопровода при различных толщинах теплоизоляции приведены на рис. 2. В расчетах использовались значения  $\lambda_2 = 0,84$  Вт/(м·К) [17],  $\lambda_3 = 0,04$  Вт/(м·К) [16],  $T_0 = 10$  °С,  $T_{ex} = -30$  °С,  $\Delta R = 10$  мм. На рис. 2 приведены, кроме того, результаты расчетов [18], выполненных по эмпирическим формулам. Хорошо видно, что результаты, полученные в рамках квазистационарной модели средних температур, практически совпадают с [18].

### Заключение

В настоящей работе выполнен анализ процесса охлаждения надземного водовода с теплоизоляцией после прекращения движения в нем воды. На основе уравнений гидродинамики и теплопроводности сформулирована модель средних температур для описания процесса охлаждения воды. Получена квазистационарная форма уравнений модели и найдено ее решение. Получены простые формулы для времени охлаждения и установлены критерии их применимости. Для широкого диапазона параметров выполнены расчеты времени охлаждения воды от заданной начальной температуры до температуры замерзания. Выполнено сравнение найденного решения уравнений с результатами, полученными по эмпирическим формулам.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы для оценки времени, в течение которого должны быть выполнены ремонтные работы и восстановлено движение воды в трубопроводе прежде, чем начнется его промерзание.



**Рис. 2.** Зависимость времени охлаждения воды в трубопроводе  $t_c$  от его радиуса  $R_1$  при различных значениях толщины слоя теплоизоляции  $\delta$ : 1 — 2 см, 2 — 5 см, 3 — 10 см, 4 — 15 см, 5 — 20 см. Начальная температура воды  $T_0 = 10$  °С, температура наружного воздуха  $T_{ex} = -30$  °С, ■, ■, ■ — данные [18]

### Библиографический список

1. Terekhov L. D. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter / L. D. Terekhov, S. B. Mayny, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. 2019. Iss. 4 (80). P. 71–78. DOI: 10.23968/2305–3488.2019.24.4.71–78.
2. Капинос О. Г. Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2023. Т. 20, вып. 1. С. 79–90.
3. Жидких В. М. Ледовый режим трубопроводов / В. М. Жидких, Ю. А. Попов. Л.: Энергия, 1979. 132 с.
4. Cheng K. C. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice-water systems and welding and casting processes / K. C. Cheng, N. Seki. New York: Hemisphere, 1991. 815 p.
5. Akyurt M. Freezing phenomena in ice-water systems / M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah // *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. P. 1773–1789.
6. Терехов Л. Д. Внутреннее обледенение водоводов в зимний период / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, Е. А. Твардовская // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. Т. 2. С. 161–164.
7. Sologubenko O. Wall damage of cylindrical heat pipes caused by water freezing / O. Sologubenko, D. Torresin, A. W. Petrov, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 232. P. 120986. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120986>.
8. Gilpin R. R. Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4°C / R. R. Gilpin // *International Journal of Heat and Mass*

Transfer. 1975. Vol. 18, iss. 11. P. 1307–1315. DOI: 10.1016/0017–9310(75)90241–0.

9. Alawadhi E. M. Cooling process of water in a horizontal circular enclosure subjected to non-uniform boundary conditions // *Energy*. 2011. Vol. 36, iss. 1. P. 586–594. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.001.

10. McDonald A. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald, B. Bscheiden, E. Sullivan, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 73 (1). P. 142–153.

11. Hongfei Xu. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment / Hongfei Xu., Dali Huang, Yue Sun, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 66. P. 104197.

12. Лапшин В. Ф. Расчет времени промерзания надземного водовода в условиях отрицательных температур // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2023. Т. 20, № 3. С. 740–750.

13. Ландау Л. Д. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. 736 с.

14. Лапшин В. Ф. Анализ процессов теплообмена на поверхности надземного трубопровода с теплоизоляцией // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2023. Вып. 3. С. 147–156. DOI: 10.20295/2223–9987–2023–3–147–156.

15. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

16. ГОСТ 21880–2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные; ред. В. Н. Копысов. М.: Стандартинформ, 2012. 10 с.

17. Физические величины: Справочник; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

18. Терехов Л. Д. Технологические основы энергосбережения при подаче воды по водоводам на Севере: специальность 05.23.04: «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов»: дис. ... д-ра техн. наук. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 1999. 275 с.

Дата поступления: 27.01.2024

Решение о публикации: 29.02.2024

#### Контактная информация:

ЛАПШИН Владимир Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор; lapshinvf@mail.ru

## Calculation of cooling time of above-ground water pipeline with heat insulation under conditions of negative temperatures

**V. F. Lapshin**

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

**For citation:** *Lapshin V. F.* Calculation of cooling time of above-ground water pipeline with heat insulation under conditions of negative temperatures // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 103–112. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-103-112

### Abstract

**Objective:** transport infrastructure facilities include a variety of water supply systems. In the event of an emergency, after stopping the movement of water in the pipeline, it is cooled first, and then there is a risk of freezing and destruction of water pipelines. This work is devoted to the calculation of the cooling time of water in the above-ground water conduit with thermal insulation from the specified temperature value in the initial state to the freezing temperature. **Methods:** when building a mathematical model of the water

cooling process, an approach is used based on averaging the equations of hydrodynamics by the volume of water in the pipeline and averaging the equations of thermal conductivity in the wall of the pipeline and in the layer of the heat insulator by the polar angle. To obtain a quasi-stationary form of equations, a comparative analysis of the rates of thermal processes in different layers of the water conduit is used. **Results:** a new mathematical model for cooling the water pipeline is formulated — a model of average temperatures. The applicability of the quasi-stationary form of the equations of the model is justified and its analytical solution is found. Explicit formulas are obtained for cooling time of water conduit as a function of its parameters. Cooling time was calculated in a wide range of parameters. The results of model calculations are compared with calculations according to traditional semi-empirical formulas. **Practical importance:** the formulas obtained in the work can be used to estimate the cooling time of water in an above-ground water pipeline with heat insulation to the freezing temperature in the case when the ambient temperature drops to negative values.

**Keywords:** above-ground water pipeline, internal icing, freezing time, mathematical modeling, quasi-stationary approximation.

## References

1. Terekhov L. D. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter / L. D. Terekhov, S. B. Mayny, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. 2019. Iss. 4 (80). P. 71–78. DOI: 10.23968/2305–3488.2019.24.4.71–78.
2. Kapinos O. G. Gidravlicheskie udary v napornyh truboprovodah pri nadzemnoj prokladke/ O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaja // *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2023. T. 20, vyp. 1. S. 79–90. (In Russian)
3. Zhidkih V. M. Ledovyy rezhim truboprovodov / V. M. Zhidkih, Ju. A. Popov. L.: Jenergija, 1979. 132 s. (In Russian)
4. Cheng K. C. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice-water systems and welding and casting processes / K. C. Cheng, N. Seki. New York: Hemisphere, 1991. 815 p.
5. Akyurt M. Freezing phenomena in ice-water systems / M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah // *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. P. 1773–1789.
6. Terekhov L. D. Vnutrennee obledenenie vodovodov v zimnij period / L. D. Terekhov, N. V. Tvardovskaja, E. A. Tvardovskaja // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrja 2021 goda. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2021. T. 2. S. 161–164. (In Russian)
7. Sologubenko O. Wall damage of cylindrical heat pipes caused by water freezing / O. Sologubenko, D. Torresin, A. W. Petrov, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 232. P. 120986. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120986.
8. Gilpin R. R. Cooling of a horizontal cylinder of water through its maximum density point at 4°C / R. R. Gilpin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1975. Vol. 18, iss. 11. P. 1307–1315. DOI: 10.1016/0017–9310(75)90241–0.
9. Alawadhi E. M. Cooling process of water in a horizontal circular enclosure subjected to non-uniform boundary conditions // *Energy*. 2011. Vol. 36, iss. 1. P. 586–594. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.001.
10. McDonald A. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald, B. Bscheiden, E. Sullivan, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 73 (1). P. 142–153.
11. Hongfei Xu. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment / Hongfei Xu., Dali Huang, Yue Sun, et al. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 66. P. 104197.
12. Lapshin V. F. Raschet vremeni promerzaniya nadzemnogo vodovoda v uslovijah otricatel'nyh temperatur // *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2023. T. 20, № 3. S. 740–750. (In Russian)

13. Landau L. D. Teoreticheskaja fizika: Uchebnoe posobie. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika / L. D. Landau, E. M. Lifshic. M.: Nauka, 1986. 736 s. (In Russian)
14. Lapshin V. F. Analiz processov teploobmena na poverhnosti nadzemnogo truboprovoda s teploizoljaciej // B'ulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2023. Vyp. 3. S. 147–156. DOI: 10.20295/2223–9987–2023–3–147–156. (In Russian)
15. Lykov A. V. Teorija teploprovodnosti. M.: Vysshaja shkola, 1967. 600 s. (In Russian)
16. GOST 21880–2011. Maty iz mineral'noj vaty proshivnye teploizoljacionnye; red. V. N. Kopysov. M.: Standartinform, 2012. 10 s. (In Russian)
17. Fizicheskie velichiny: Spravochnik; pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlihova. M.: Jenergoatomizdat, 1991. 1232 s. (In Russian)
18. Terehov L. D. Tehnologicheskie osnovy jenergosberezhenija pri podache vody po vodovodam na Severe: special'nost' 05.23.04: "Vodosnabzhenie, kanalizacija, stroitel'nye sistemy ohrany vodnyh resursov": dis. ... d-ra tehn. nauk. Habarovsk: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 1999. 275 s. (In Russian)

Received: 27.01.2024

Accepted: 29.02.2024

**Author's information:**

Vladimir F. LAPSHIN — Dr. Sci. in Physical and Mathematical Sciences, Professor; lapshinvf@mail.ru



УДК 628.24

## Анализ аварийности канализационных трубопроводов внутриконтинентального города Северного Китая

**Д. Ван, Л. Д. Терехов**

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

**Для цитирования:** Ван Д., Терехов Л. Д. Анализ аварийности канализационных трубопроводов внутриконтинентального города Северного Китая. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 113–124. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-113-124

### Аннотация

**Цель:** провести анализ причин разрушения канализационных трубопроводов, которые произошли во внутриконтинентальном городе Северного Китая с 2017 по 2022 год, и дать предложения по снижению количества аварийных ситуаций. **Методы:** описать причины разрушений канализационных трубопроводов и провести их сравнительный анализ. **Результаты:** в результате проведенного исследования установлено, что трубопроводы канализационной сети города довольно старые и имеют высокую аварийность. Основными причинами возникновения аварийных ситуаций являются процессы коррозии, разрывы труб, обильное выпадение атмосферных осадков. В работе предложены меры по повышению надежности работы таких трубопроводов, включающие наблюдение и контроль за состоянием трубопроводов с последующим назначением различных видов восстановительных работ. **Практическая значимость:** результаты работы рекомендуется учитывать при решении проблем разрушения канализационных трубопроводов в других районах Китая.

**Ключевые слова:** канализационный трубопровод, бытовые сети водоотведения, дождевые сети водоотведения, аварии, анализ причин, повышение надежности.

### Введение

Водоотводящие трубопроводы являются важной частью муниципальной инфраструктуры для сбора и транспортировки городских бытовых и дождевых сточных вод к местам очистки. Условия их эксплуатации напрямую влияют на безопасность городской деятельности и экологическую среду. Согласно Статистическому ежегоднику городского и сельского строительства Министерства жилищного строительства и городского развития КНР, по состоянию на 2021 год длина городских канализационных трубопроводов в стране достигла 872 283 км. Существующие трубопроводы выходят из

строения из-за старения, дождевой эрозии и других причин [1–4]. Это может вызвать вторичные проблемы (подтопление городов, загрязнение воды водоемов и обрушение дорог) и оказать негативное влияние на безопасную эксплуатацию города и общественное пространство [5–8]. С учетом этого в данной статье анализируются следующие основные причины разрушения канализационных трубопроводов: срок эксплуатации трубопроводов, наличие дефектов в их конструкции, влияние атмосферных осадков, материала трубопровода и наличия внешних факторов при неглубокой прокладке трубопроводов,

а также предлагаются меры по предотвращению подобных ситуаций с целью решить проблему разрушения канализационных трубопроводов в других регионах страны.

В качестве района исследования в данной статье рассматривается застроенная территория внутриконтинентального города на севере Китая с общей длиной канализационных трубопроводов 9204 км, из которых 4693 км — это длина трубопроводов бытовой канализации и 4521 км — протяженность труб дождевой водоотводящей сети. На данной территории с 2017 по 2022 год произошло в общей сложности 1044 случая обрушения канализационных труб, в том числе 802 аварийных случая на бытовой канализационной сети и 242 случая — на дождевой сети. Распределение аварий по трубопроводам различного типа по годам представлено в табл. 1.

## 1. Анализ причин аварий на канализационных трубопроводах

### 1.1. Срок эксплуатации трубопроводов

Согласно «Техническим условиям городского водоснабжения и водоотведения» (GB 5078–2012) конструктивный срок службы основных сооружений и подземных трубопроводов систем городского водоснабже-

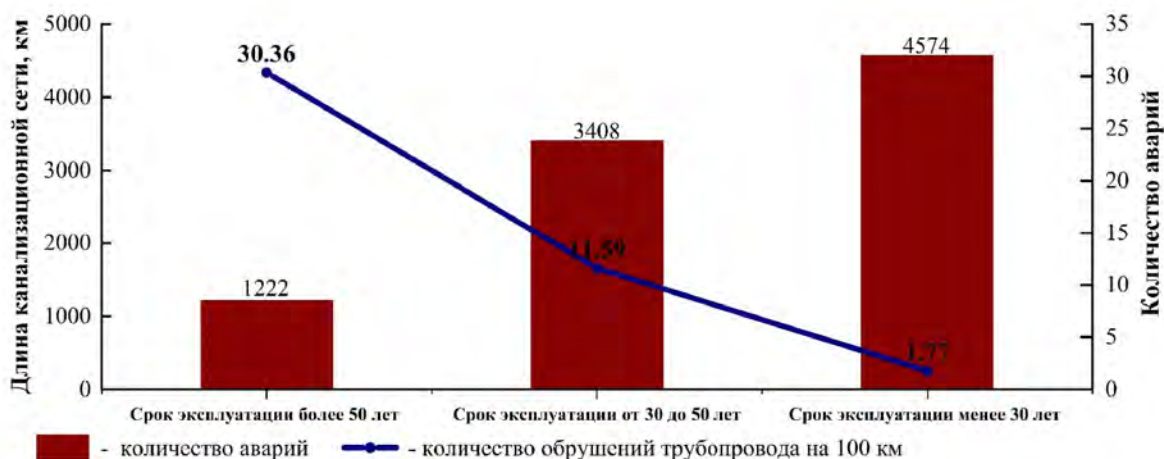
ния и водоотведения должен быть не менее 50 лет. Трубопроводы, у которых имеется превышение срока эксплуатации над проектным, склонны к обрушению из-за низких стандартов проектирования трубопроводов, обусловленных их строительством в разные исторические периоды.

Приведенные 802 случая разрушения канализационных трубопроводов можно разбить по сроку эксплуатации на следующие группы: в 350 случаях трубопроводы эксплуатировались более 50 лет, что составляет 41%; в 395 случаях срок эксплуатации был от 30 до 50 лет, что составляет 47%; на трубопроводах со сроком эксплуатации до 30 лет было 102 случая аварий, что составляет 12%.

Статистика показывает (рис. 1), что протяженность канализационных трубопроводов, эксплуатирующихся более 50 лет, составляет примерно 1222 км (13,3%), от 30 до 50 лет — примерно 3408 км (37%), со сроком службы до 30 лет — примерно 4574 км (49,7%). Учитывая длину канализационных трубопроводов с различным сроком эксплуатации, на 100 км сети приходится более 30 случаев обрушений трубопроводов старше 50 лет и менее двух случаев обрушений на 100 км для трубопроводов со сроком эксплуатации менее 30 лет. Случаи обрушений

ТАБЛИЦА 1. Информация об авариях на канализационных трубопроводах с 2017 по 2022 год

Год	Количество аварий на трубопроводах бытовой канализационной сети	Количество аварий на трубопроводах дождевой канализации	Всего
2017	152	46	198
2018	147	37	184
2019	124	39	163
2020	129	34	163
2021	130	35	165
2022	120	51	171
Итого	802	242	1044



**Рис. 1.** Протяженность и количество аварий на канализационных трубопроводах в зависимости от срока их эксплуатации

для трубопроводов, срок эксплуатации которых превысил нормируемый конструктивный предел, имеют наибольшую вероятность. Зависимость количества аварийных ситуаций с учетом срока эксплуатации трубопроводов приведена на рис. 1.

## 1.2. Конструктивные дефекты

Согласно «Оценке конструкции городских дренажных труб» (DB11/T 1492–2017), структурные дефекты трубопроводов делятся на несколько категорий (видов), главными из которых являются: коррозия, разрыв, деформация, несоосность. По степени тяжести они делятся на легкие, средние и тяжелые. Категория и степень конструктивных дефектов влияют на прочность, жесткость и срок службы трубопроводов. Виды и степени конструктивных дефектов, влияющих на обрушение канализационных трубопроводов бытовых и дождевых сточных вод, существенно отличаются [1].

По данным осмотра и оценки, в 969 случаях до обрушения трубопровода имелись дефекты различной степени тяжести, основными из которых были коррозия, несо-

осность, разрыв, деформация, что соответственно составило 61, 19, 15 и 3 %, включая 744 случая обрушения труб бытовых сетей и 225 случаев обрушения труб дождевой канализации.

### 1.2.1. Характеристика конструктивных дефектов труб сетей бытовой канализации

Наиболее частым конструктивным дефектом, предшествующим разрушениям трубопроводов бытовой сети, была коррозия — 595 случаев, что составляет 80 % от общего числа. Причиной коррозии [9–11] является то, что сероводород и серная кислота, продуцированные микроорганизмами сточных вод, в течение длительного времени воздействуют на трубопровод, в результате чего внутренняя стенка трубопровода постепенно становится тоньше, что впоследствии приводит к снижению прочности конструкции трубы и затем ее разрушению. Для железобетонных трубопроводов по степени тяжести коррозии в 165 случаях — это сильная коррозия с разрушением бетона и оголением стальной арматуры на трубопроводе, что

составляет 28 % от общего числа коррозионных дефектов, в 252 случаях — средняя коррозия с частичным разрушением бета, что составляет 42 %, и в 178 случаях — легкая коррозия с отслаиванием стенок труб, составляющая 30 %.

Аварий из-за конструктивных дефектов в виде разрывов больше в 96 случаях, что составляет 13 % от общего их числа. Они проявляются в основном в виде дефектов стыковых соединений трубопроводов или длинных продольных трещин. Разрушение труб в таких случаях происходит после уменьшения несущей способности трубы. По степени тяжести разрывы в 61 случае были тяжелыми с явным разрушением трубы, что составило 64 % от общего количества дефектов по разрывам, в 35 случаях — это разрывы средней тяжести с явными трещинами, что составило 36 %. И только 7 % суммарно составляют другие виды дефектов. В табл. 2 представлены основные численные данные по влиянию на количество аварий видов и тяжести дефектов.

### 1.2.2. Характеристика конструктивных дефектов труб дождевой канализации

Наиболее распространенными конструктивными дефектами разрушений трубопроводов дождевой водоотводящей сети была несоосность труб (всего 153 случая, что составило 68 % от общего их числа) и разрывы (49 случаев, что составило 22 %), 10 % случаев аварий связано с коррозией и деформациями. Все четыре типа дефектов нарушают герметичность дождевой сети. В этом случае дождевая вода непрерывно размывает почву вокруг труб через зазоры, вызванные конструктивными дефектами, образуя полости, в результате чего вся труба тонет или ломается. По степени дефектов выявлено 147 тяжелых дефектов, что составляет 65 % от общего их числа, и 59 дефектов средней степени тяжести, что составляет 25 %.

Подводя итог, можно сказать, что коррозионные дефекты являются основной причиной обрушения канализационных трубопроводов бытовой сети, причем обрушение труб может происходить с разной степенью

ТАБЛИЦА 2. Количество аварий на канализационных трубопроводах при различных видах дефектов трубопроводов и их степени тяжести

Степень тяжести дефекта	Количество аварий на трубопроводах бытовой канализации по видам дефектов					Количество аварий на трубопроводах дождевого стока по видам дефектов			
	Коррозия	Разрыв	Смещение оси	Деформация	Другие	Смещение оси	Разрыв	Коррозия	Деформация
Легкие	178	0	0	0	0	15	4	0	0
Средние	252	35	11	7	0	37	15	6	1
Тяжелые	165	61	20	7	8	101	30	12	4
Итого	595	96	31	14	8	153	49	18	5
От общего числа дефектов трубопроводов, %	79,97	12,90	4,17	1,88	1,08	68,00	21,78	8,0	2,22

коррозионных дефектов; точечные дефекты, такие как несоосность и разрыв, являются основной причиной обрушения труб дождевой канализации в виде средних и тяжелых дефектов по их тяжести. Конструктивные дефекты приводят к более высокой вероятности обрушения трубопровода.

### 1.3. Влияние атмосферных осадков

В засушливый сезон городская почва имеет низкую влажность. С наступлением сезона дождей насыщенность почвы продолжает увеличиваться после частых осадков, а прочность на сдвиг снижается, что влияет на прочность канализационных труб. Частые атмосферные осадки вызывают повышение уровня грунтовых вод, который увеличивает давление грунтовых вод на почву вокруг трубопровода, в определенных случаях разрушая конструкцию трубопровода. Большинство труб дождевой сети спроектированы в соответствии с «Правилами проектирования наружного водоотведения» (GBJ 14–87, изд. 1997 г.). Обильные атмосферные осадки могут легко привести к переполнению труб дождевой водоотводящей сети, а большое дав-

ление воды может нарушить прочность самих труб. Вышеуказанные факторы приводят к увеличению количества случаев обрушения канализационных труб в сезон дождей.

По данным сравнения ежемесячных случаев разрушений на трубопроводах дождевой сети, количество аварийных случаев с июня по сентябрь составляет более 50% от всего года, при этом наибольшая доля приходится на 2017 год — 64%, немного меньше на 2020 год — 63% (рис. 2).

Совокупное количество осадков с июня по сентябрь 2017 года составило 483 мм, при этом произошло 123 случая обрушения трубопровода (рис. 3). Суммарное количество осадков с июня по сентябрь 2019 года составило 356 мм, при этом произошло 78 случаев обрушения трубопровода. Отмечается зависимость: если суточное количество осадков в одном месте превышает 50 мм, то обрушение трубопровода может произойти в течение короткого периода времени. Например, 21 июня 2017 года среднее количество осадков составило 114 мм, и в течение семи дней после дождя произошло 22 случая обрушения трубопровода;

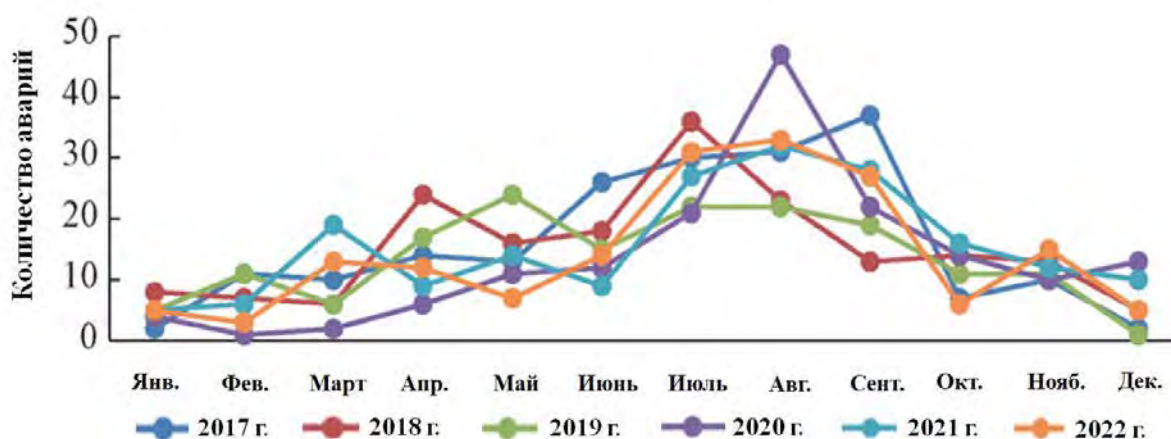
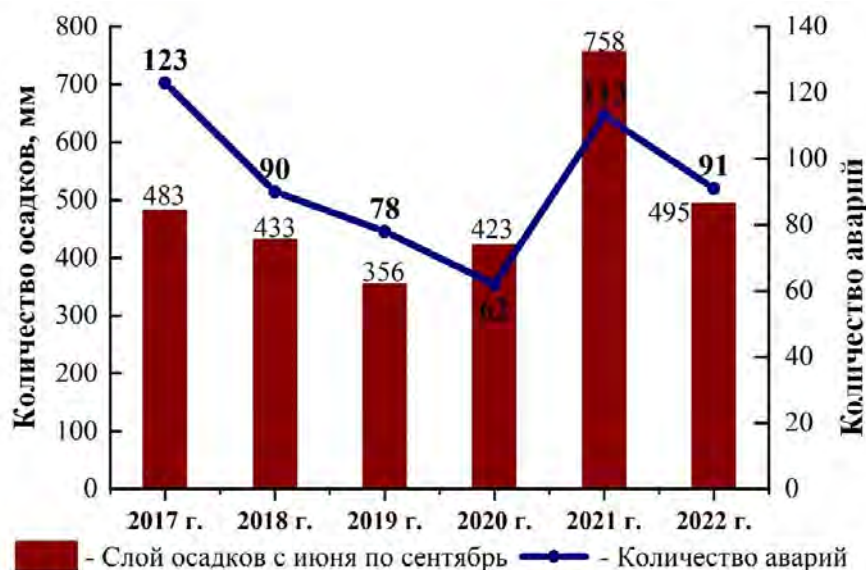


Рис. 2. Распределение количества аварий по месяцам на трубопроводах дождевой сети за 2017–2022 годы



**Рис. 3.** Количество аварий на трубопроводах дождевой сети в зависимости от количества осадков с июня по сентябрь 2017–2022 годов

28 июля 2022 года среднесуточное количество осадков составило 120 мм и за семь дней после дождя произошло 11 обрушений трубопровода.

#### 1.4. Влияние материала трубопроводов

Наиболее часто используемыми для устройства канализационных трубопроводов являются бетонные (82%) и пластиковые трубы (8%). Кроме этого, используются трубы и каналы из других материалов: керамические и металлические трубы, каналы прямоугольного сечения и т.п., на долю которых приходится 10%. В последние годы сети таких типов реже используются при строительстве городских канализационных трубопроводов.

Среди 814 случаев аварий разрушения были зафиксированы на трубопроводах из бетонных труб, в 109 случаях — из пластиковых труб и в 121 случае — из других материалов (рис. 4). Для последней группы обруше-

ние боковой стенки каналов прямоугольного сечения стало причиной большинства случаев аварий — в общей сложности 73 случая, что составляет 60% от общего числа случаев для данного типа.

В сочетании с длиной трубопроводов, изготовленных из различных материалов, наибольшее количество случаев аварий на 100 километров приходится на пластиковые трубы, которое составляет чуть более 14; число случаев для трубопроводов из других материалов — чуть более 13, а для бетонных труб количество аварийных ситуаций на 100 километров длины наименьшее — менее 11. Существует три основные причины, по которым пластиковые трубопроводы имеют более высокую вероятность разрушения. Во-первых, это качество строительства трубопроводов — их можно легко повредить во время строительства, например при прокладке или засыпке. Во-вторых, пластиковые трубы часто используются в условиях

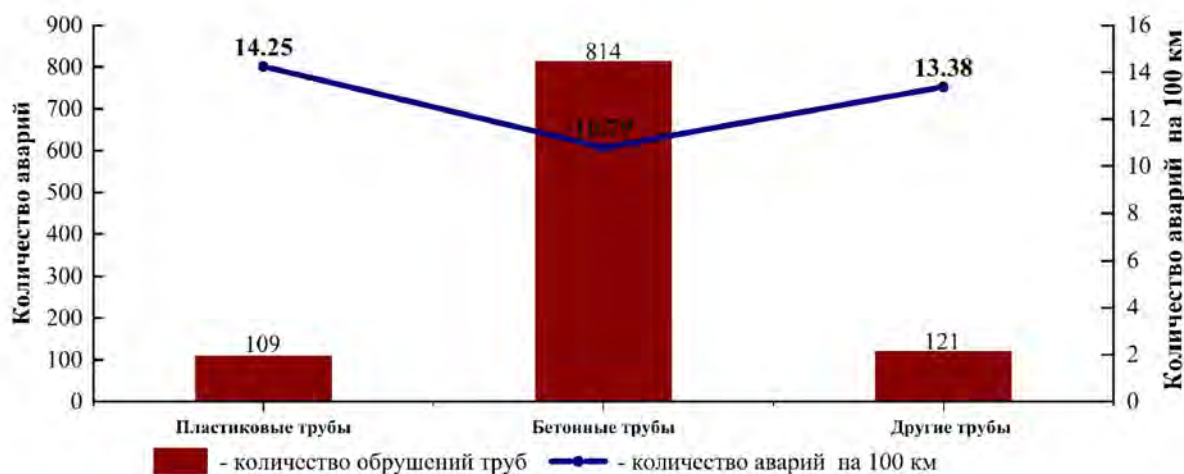


Рис. 4. Количество аварий на трубопроводах дождевой сети в зависимости от материалов труб

ТАБЛИЦА 3. Количество разрушений канализационных труб разной глубины заложения

Глубина заложения	0~1 м	1~2 м	2~3 м	3~4 м	4~5 м	5~6 м	Более 6 м
Количество аварий	123	202	224	245	137	66	47

с небольшой глубиной заложения и малым диаметром и поэтому более подвержены обрушению из-за внешних воздействий. В третьих, установленные пластиковые трубы неправильно обрабатываются, что приводит к перекосу и нарушению стыковых соединений.

### 1.5. Влияние внешних факторов при небольшой глубине заложения трубопроводов

В последние годы городское развитие в КНР шло быстрыми темпами, и проводимые при этом ремонтные или строительные работы, связанные с передвижением тяжелых транспортных средств, строительством других подземных коммуникаций, строительством метро и др., могут при несоблюдении строительных нормативов нарушить работу канализационных трубопроводов, проходящих на небольшой глубине.

Кроме этого, в КНР постоянно растут нагрузки на автомобильные дороги из-за увеличения количества автотранспорта, которые передаются через грунт на коммуникации, в том числе на канализационные трубопроводы при их небольшой глубине заложения.

Как показано в табл. 3, зарегистрировано 325 случаев разрушений трубопроводов при глубине их заложения менее 2 м, что составляет 31 % от общего количества аварий.

### 2. Меры по снижению количества аварий на трубопроводах

Канализационные трубопроводы представляют собой самотечные подземные сети, поэтому возможные места дефектов скрыты, а при возникновении аварийных ситуаций они могут легко приводить к подтоплению территорий, обрушению дорог или загрязнению воды водоемов. Чтобы уменьшить

количество аварийных случаев на канализационных трубопроводах, рекомендуется [12] осуществлять управление и проведение профилактических работ по трем направлениям: осмотр трубопроводов, их ремонт и аварийно-спасательные работы. Согласно проведенному анализу, основными факторами, вызывающими обрушение канализационных трубопроводов, являются срок эксплуатации труб, превышающий расчетный, конструктивные дефекты трубопровода и влияние атмосферных осадков. С учетом этого рассмотрим основные предлагаемые мероприятия.

### 2.1. Осмотр трубопроводов

Необходимо создать и усовершенствовать систему обнаружения дефектов канализационных трубопроводов, оценить типы и количество существующих конструктивных дефектов и планировать с учетом результатов обследований проведение ремонтных работ в установленном порядке. В то же время необходимо формировать механизм периодического контроля и оценки, позволяющий регулярно наблюдать за развитием дефектов, которые не были устранены вовремя, и своевременно корректировать план восстановления трубопроводов. Требуется проводить обследование и оценку верхних и нижних участков обрушившихся трубопроводов и последующий их ремонт.

Необходимо унифицировать механизм ежедневного осмотра, сформулировать специальные планы проверок поврежденных трубопроводов, которые еще не были отремонтированы, увеличить частоту проверок и начать проверки в верхних и нижних смотровых колодцах умеренно и сильно дефектных трубопроводов для наблюдения за изменениями расхода жидкости в трубопроводе

и своевременно обнаруживать обрушения. В то же время оперативные подразделения должны связаться с отделом управления городскими дорогами, чтобы получить разрешения на работы по подземным трубопроводам на территории улиц, автодорог, метро и других объектов.

Необходимо усилить онлайн-мониторинг канализационных трубопроводов в соответствии с [10]. Производственные подразделения должны устанавливать оборудование для онлайн-мониторинга с целью наблюдения за уровнем жидкости и скоростью потока выше и ниже по течению от точек со средними и тяжелыми дефектами трубопроводов и осуществлять их мониторинг в режиме реального времени, что позволит своевременно принять меры и устранить возможность возникновения аварий.

### 2.2. Ремонт трубопроводов

Необходимо создать механизм регулярного ремонта канализационных трубопроводов, всесторонне учитывать геологические и гидрологические условия, условия движения транспорта и другие факторы, рационально назначать процессы ремонта открытым и закрытым способами, определять приоритетность ремонтных работ на объектах с высокой скрытой опасностью и сильными воздействиями. Для подземных трубопроводов с большими диаметрами и большими расходами, если на участке нет условий для отвода воды, для решения проблемы рекомендуется построить новые параллельные трубопроводы и соединительные ветки.

Требуется усилить контроль качества строительства канализационных трубопроводов и осуществлять строительство объектов в строгом соответствии с нормативными документами, проектными и строительными



чертежами. В частности, глубина заложения труб канализационной сети должна быть рассчитана так, чтобы предотвратить возникновение дефектов в виде перекосов, способствующих нарушению герметичности раструбов стыковых соединений и выпадению резиновых колец. Все работы по строительству трубопроводов должны осуществляться в соответствии с техническими и проектными требованиями с проведением последующих гидравлических испытаний.

При строительстве и ремонте трубопроводов с небольшой глубиной заложения следует использовать специальную дополнительную защиту, чтобы свести к минимуму возможные внешние воздействия на трубопроводы.

### 2.3. Аварийно-спасательные мероприятия

Требуется создать механизм управления аварийно-спасательными работами. Оперативные подразделения должны создать механизм полного взаимодействия с различными городскими ведомствами, усилить обмен информацией и оперативно обнаруживать случаи обрушения канализационных трубопроводов. Необходимо создать профессиональные аварийно-спасательные команды для реагирования на обрушение трубопроводов, которые могут произойти в любой момент времени; стандартизировать последовательность действий при возникновении таких чрезвычайных ситуаций, которая гарантирует, что последствия происшествия будут сведены к минимуму.

Необходимо стандартизировать правила проведения спасательных работ. Ремонтные работы должны выполняться в кратчайшие сроки. При ремонте подземного трубопровода необходимо вскрыть грунт в месте аварии, восстановить трубопровод, произвести

засыпку трубопровода и при необходимости выполнить специальную дополнительную защиту для обеспечения прочности конструкции. В то же время при производстве ремонтных работ следует всесторонне учитывать большие потоки сточных вод при выпадении атмосферных осадков и предусмотреть план отвода воды для предотвращения переполнения канализационных трубопроводов и обратного движения стоков в таких случаях.

### Заключение

В статье проведен анализ аварийных ситуаций канализационных трубопроводов внутриконтинентального города Северного Китая в период с 2017 по 2022 год. Установлено, что трубопроводы системы водоотведения довольно старые и имеют высокую аварийность. Основными причинами аварий являются коррозия, разрывы труб, а также влияние атмосферных осадков. В результате анализа аварий на канализационных трубопроводах были предложены следующие меры по предотвращению и ликвидации таких ситуаций: разработка стандартов проведения аварийных работ, создание механизма систематических проверок и онлайн-диагностики для своевременного выявления дефектов и разрушений трубопроводов, проведение ремонтных работ трубопроводов с соблюдением всех нормативных требований.

### Библиографический список

1. Хуан Жунминь, Чжан Е, Лю Ка, и др. Характеристики распределения дефектов муниципальных дождевых и канализационных труб при проверке трубопроводной сети города W // *China Water Supply and Drainage*. 2023. № 39 (2). С. 87–93.
2. Чэнь Шаобо, Ян Юйсюань, Ван Хао и др. Исследование типичных типов дефектов и анализ причинно-следственных механизмов городских во-

доотводящих сетей южного побережья // Водоснабжение и водоотведение. 2022. № 48. С. 464–470.

3. Юань Хуэйчжоу, Ван Сяосюн, Юань Цзяцзя, Анализ аварий на муниципальных канализационных трубах и профилактические меры в южном городе // Водоснабжение и водоотведение. 2021. № 47 (7). С. 112–116.

4. Цю Чжихай. Анализ проблем качества при строительстве водоотводящих сетей Шэньчжэня и обсуждение мер контроля качества и контроля // Технический надзор за охраной водных ресурсов. 2017. № 25 (4). С. 20–21.

5. Терехов Л. Д., Майны Ш. Б., Терехова Е. Л. Особенности реконструкции систем водоснабжения и водоотведения в условиях глубокого сезонного промерзания грунтов // Сантехника. 2024. № 1. С. 30–37.

6. Проблемы изношенных трубопроводов Дальнего Востока России и пути их восстановления / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, А. В. Федорчук и др. // «Яковлевские чтения — 2022»: Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения: сб. докладов участников XVII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева. М., 2022. С. 54–61.

7. Терехов Л. Д., Твардовская Н. В., Федорчук А. В. Комбинированный способ бестраншейного ремонта коммунальных трубопроводов // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сб. трудов. СПб., 2021. С. 159–161.

8. Ху Юйхан, Бай Юйчуань, Сюй Хайцзюэ. Анализ причин и стратегии предотвращения обрушений городских дорог в Китае за последние 10 лет // Highways. 2016. № 61 (9). С. 130–135.

9. Лю Хуапин, Ли Тянь, Дуань Сяопин. Сероводородная коррозия и контроль канализационных трубопроводов // Муниципальные технологии. 2004. № 5. С. 282–284.

10. Цзян Сяодун, Юй Кайхуа, Бао Юэцюань и др. Предварительный анализ воздействия серной коррозии на комбинированные канализационные трубы большого диаметра // Технология очистки воды. 2016. № 35 (6). С. 37–44.

11. Хао Сяоди, Ян Чжэньли, Чжан Инин и др. Механизм производства и стратегии контроля  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в канализационных трубах // Журнал экологической инженерии. 2023. № 17 (1). С. 1–12.

12. Ян Дунни. Проблемы управления качеством муниципальных водоотводящих проектов и стратегии улучшения // Новая индустриализация. 2022. № 12(12). С. 129–131.

Дата поступления: 01.02.2024

Решение о публикации: 01.03.2024

**Контактная информация:**

ВАН Дунлян — аспирант кафедры

«Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»;  
wangdongliang@yandex.ru

ТЕРЕХОВ Лев Дмитриевич — докт. техн. наук,  
проф.; levter4@rambler.ru

## Analysis of the accident rate of drainage pipelines in an inland city in northern China

D. Wang., L. D. Terekhov

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

**For citation:** Wang D., Terekhov L. D. Analysis of the accident rate of drainage pipelines in an inland city in northern China // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 113–124. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-113-124

### Abstract

**Purpose:** to analyze the causes of the destruction of drainage pipelines that occurred in an inland city in northern China from 2017 to 2022 and make proposals to reduce the number of emergency situations. **Methods:** describe the causes of destruction of drainage pipelines and conduct a comparative analysis. **Results:** as a result of the study, it was found that the pipelines of the inland city in northern China sewerage network are quite old and have a high accident rate. The main causes of emergency situations are corrosion processes, pipe ruptures, and heavy precipitation. The work proposes measures to improve the reliability of the operation of such pipelines, including monitoring and monitoring the condition of pipelines with the subsequent assignment of various types of restoration work. **Practical significance:** the results of the work are recommended to be taken into account when solving problems of destruction of drainage pipelines in other regions of China.

**Keywords:** drainage pipeline, household drainage networks, rainwater drainage networks, accidents, cause analysis, increasing reliability.

### References

1. Huan Zhunmin', Chzhan E, Lju Ka, i dr. Harak-teristiki raspredelenija defektov municipal'nyh dozhd-nyh i kanalizacionnyh trub pri proverke truboprovod-noj seti goroda W // China Water Supply and Drainage. 2023. № 39 (2). S. 87–93. (In Russian)
2. Chjen' Shaobo, Jan Jujsjuan', Van Hao, i dr. Issle-dovanie tipichnyh tipov defektov i analiz prichinno-sledstvennyh mehanizmov gorodskih vodootvodjashhij setej juzhnogo poberezh'ja // Vodospabzhenie i vodoot-vedenie. 2022. № 48. S. 464–470. (In Russian)
3. Juan' Hujejchzhou, Van Sjaosjun, Juan' Czjaczja, Analiz avarij na municipal'nyh kanalizacionnyh trubah i profilakticheskie mery v juzhnom gorode // Vodospabzhenie i vodootvedenie. 2021. № 47 (7). S. 112–116. (In Russian)
4. Cju Chzhijhaj. Analiz problem kachestva pri stroi-tel'stve vodootvodjashhij setej Shjen'chzhjenja i obsuzhdenie mer kontrolja kachestva i kontrmer // Tehnich-eskij nadzor za ohranoj vodnyh resursov. 2017. № 25 (4). S. 20–21. (In Russian)
5. Terekhov L. D., Majny Sh. B., Terehova E. L. Oso-bennosti rekonstrukcii sistem vodosnabzhenija i vodoot-vedenija v uslovijah glubokogo sezonnogo promerzanija gruntov // Santehnika. 2024. № 1. S. 30–37. (In Russian)
6. Problemy iznoshennyh truboprovodov Dal'nego Vostoka Rossii i puti ih vosstanovlenija / L. D. Terekhov, N. V. Tvardovskaja, A. V. Fedorchuk, i dr. // "Jakovlevskie chtenija — 2022": Sistemy vodosnabzhenija i vodootve-denija. Sovremennye problemy i reshenija: sb. dokladov uchastnikov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii, posvjashhennoj pamjati akademika RAN S. V. Jakovleva. M., 2022. S. 54–61.
7. Terekhov L. D., Tvardovskaja N. V., Fedorchuk A. V. Kombinirovannyj sposob bestranshejnogo remonta kom-munal'nyh truboprovodov // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sb. trudov. SPb., 2021. S. 159–161. (In Russian)

8. Hu Jujhan, Baj Jujchuan', Sjuj Hajczjuje. Analiz prichin i strategii predotvrashhenija obrushenij gorodskih dorog v Kitae za poslednie 10 let // Highways. 2016. № 61 (9). S. 130–135. (In Russian)
9. Lju Huapin, Li Tjan', Duan' Sjaopin. Serovodorodnaja korrozija i kontrol' kanalizacionnyh truboprovodov // Municipal'nye tehnologii. 2004. № 5. S. 282–284. (In Russian)
10. Czjan Sjaodun, Juj Kajhua, Bao Jujecjuan' i dr. Predvaritel'nyj analiz vozdeystvija sernoj korrozii na kombinirovannye kanalizacionnye truby bol'shogo diametra // Tehnologija ochistki vody. 2016. № 35 (6). S. 37–44. (In Russian)
11. Hao Sjaodi, Jan Chzhjen'li, Chzhan Inin i dr. Mehanizm proizvodstva i strategii kontrolja CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S i N<sub>2</sub>O v kanalizacionnyh trubah // Zhurnal je-kologicheskoy inzhenerii. 2023. № 17 (1). S. 1–12. (In Russian)
12. Jan Dumni. Problemy upravlenija kachestvom municipal'nyh vodootvodjashhih proektov i strategii uluchshenija // Novaja industrializacija. 2022. № 12(12). S. 129–131. (In Russian)

Received: 01.02.2024

Accepted: 01.03.2024

**Author's information:**

Dongliang WANG — Postgraduate Student of the Department of Water Supply, Sewage and Hydraulics; wangdongliang@yandex.ru

Lev D. TEREKHOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; levter4@rambler.ru



УДК 629.488

## **Порядок постановки на производство тягового и нетягового подвижного состава и их элементной базы, эксплуатирующихся на инфраструктуре ОАО «РЖД», предприятиями машиностроительного и ремонтного комплекса с целью установления им нового назначенного срока службы**

**Р. Х. Рафиков, А. С. Шинкарук, Н. А. Горюнов**

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

*Для цитирования:* Рафиков Р. Х., Шинкарук А. С., Горюнов Н. А. Порядок постановки на производство тягового и нетягового подвижного состава и их элементной базы, эксплуатирующихся на инфраструктуре ОАО «РЖД», предприятиями машиностроительного и ремонтного комплекса с целью установления им нового назначенного срока службы // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 125–141. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-125-141

### **Аннотация**

**Цель:** рассмотреть порядок существующих процедур оценки подвижного состава для возможности продления ему фактического срока службы по существующим методикам. Исследовать действующие процедуры проведения продления срока службы локомотивов и пассажирских вагонов путем их фактической оценки технического состояния каждой единицы подвижного состава путем проведения ему технического диагностирования, по результатам которого принимается решение установления ему нового назначенного срока (ресурса). **Методы:** сравнение процедур продления срока службы тягового и нетягового подвижного состава. Оценка и определение наиболее подверженных коррозионному и усталостному разрушению элементов тягового подвижного состава и пассажирских вагонов локомотивной тяги. Анализ существующей нормативно-технической базы и процедур диагностирования локомотивов и пассажирских вагонов для возможного принятия решения и осуществления им проведения процедуры продления фактического срока эксплуатации. **Результат:** установлены причины ограничения проведения процедуры установления нового назначенного срока службы подвижного состава и даны научно обоснованные предложения по актуализации нормативных документов. Предложена расширенная модель технической подготовки производства с учетом рассмотрения основных системных этапов. Установлены участки, наиболее подверженные износу в эксплуатационный период времени для проведения профилактических мероприятий по их своевременному устранению. Сформированы пять основных направлений обеспечения легитимной эксплуатации подвижного состава по истечении его срока службы и получению результата о возможности его дальнейшего использования. **Практическая значимость:** создание процедуры установления нового назначенного срока службы (ресурса) подвижному составу, позволяющая структурным предприятиям локомотивного и пассажирского комплексов обеспечить взаимодействие с их разработчиками и изготовителями в части реализации данного процесса.

**Ключевые слова:** техническая подготовка производства, ремонтная документация, тяговый и нетяговый подвижной состав, квалификационная комиссия.

## Введение

Несмотря на значительность принимаемых мер со стороны изготовителей подвижного состава, инфраструктурного комплекса, существующие риски санкционного давления со стороны недружественных Российской Федерации стран требуют необходимости поиска альтернативных поставщиков ряда номенклатуры запасных частей и материалов, применяемых при изготовлении тягового и нетягового подвижного состава (далее — ТПС и НТПС). Данные факты свидетельствуют о необходимости поиска незамедлительных решений в части обеспечения тяговыми и эксплуатационными ресурсами железнодорожной отрасли для выполнения существующих и возрастающих потребностей в перевозке грузов и пассажиров.

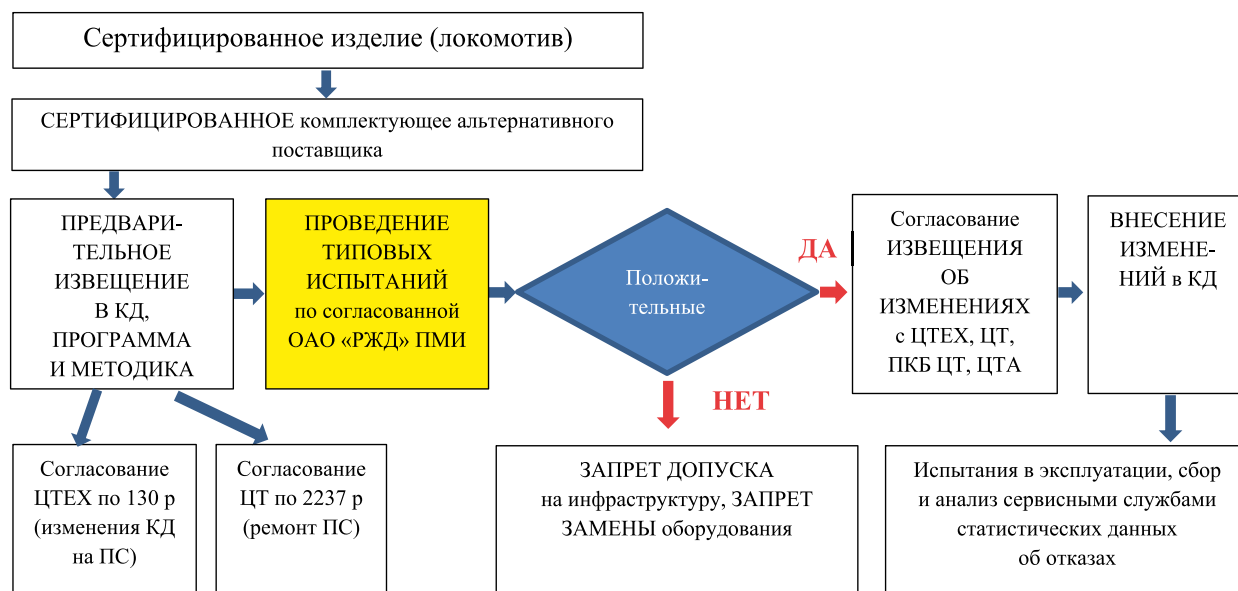
Существующая нормативная база позволяет осуществлять продление срока службы (далее — ПСС) ряду серий ТПС и моделей НТПС. Однако сама процедура проведения

ПСС подвижному составу ограничена требованиями пункта 11 статьи 4 [1] в части наличия в конструкторской документации (далее — КД) на ряд серий (моделей) подвижного состава в части установления им данного временного периода. Таким образом, для возможности продления эксплуатации подвижного состава с установлением им нового назначенного срока (ресурса) необходимо:

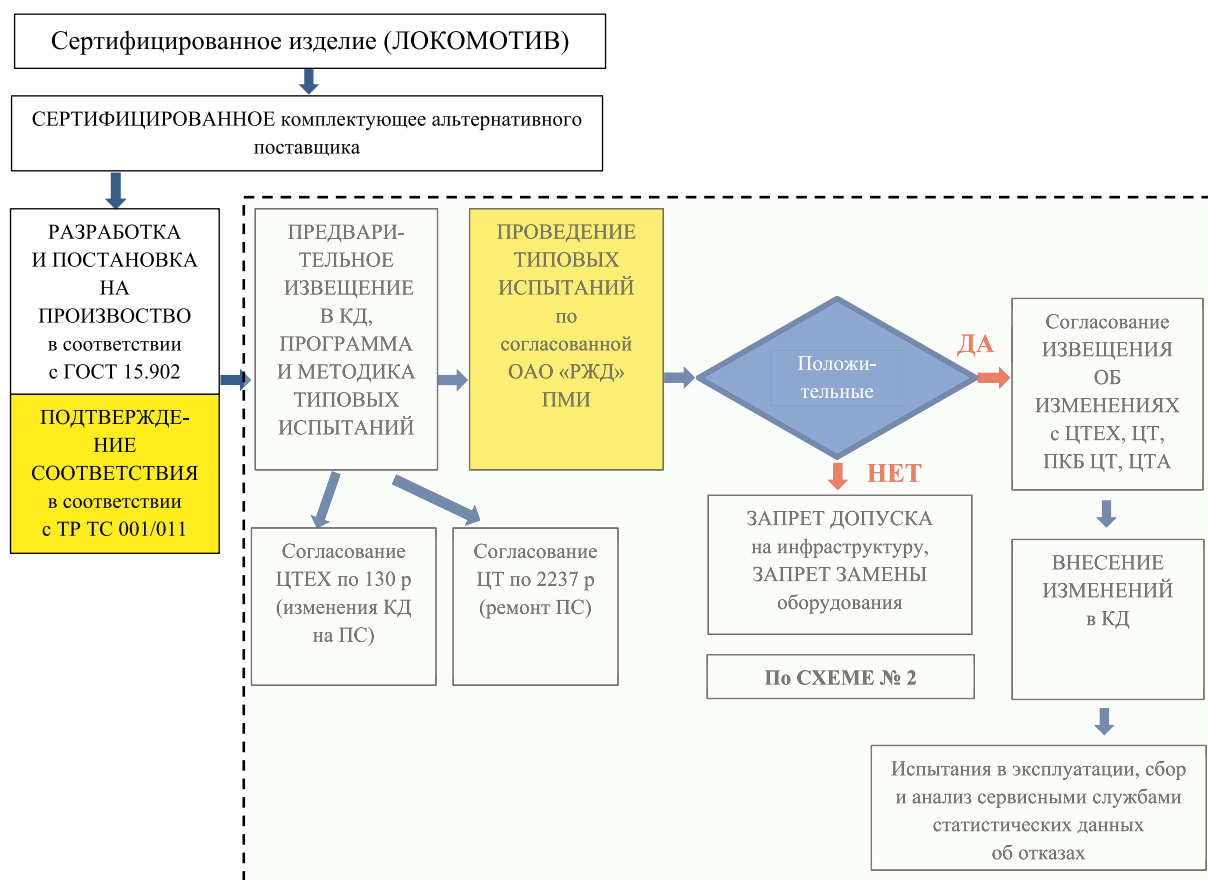
а) изготовителю (держателю) КД внести на соответствующую серию локомотива или модель пассажирского вагона [2] процедуру возможного назначения (продления) нового срока службы с внесением в нее соответствующих изменений (рис. 1, 2);

б) при отсутствии в КД назначенного срока службы изготовитель (держатель) КД вносит в нее соответствующие изменения;

в) проведение процедуры технического диагностирования (далее — ТД) и по



**Рис. 1.** Замена комплектующего альтернативного поставщика, прошедшего обязательное подтверждение соответствия в форме сертификации или декларирования, а также постановки на производство



**Рис. 2.** Замена комплектующего альтернативного поставщика, требующего обязательного подтверждения соответствия в форме сертификации или декларирования, а также постановки на производство

результатам положительного заключения, вносятся изменения установленным порядком о назначении нового срока службы (далее — ННСС) подвижному составу согласно требованиям [3, 4];

г) аналогичную процедуру подтверждения возможности эксплуатации должен проходить подвижной состав, имеющий историческую ценность и подпадающий под понятие «исторический железнодорожный подвижной состав» [5].

Однако проведение подготовки производства для осуществления процедуры ТД, написание технологического процесса проведения данных работ по ННСС [3, 4] с после-

дующей возможностью его эксплуатации на инфраструктуре ОАО «РЖД» неоднократно являлось темой для обсуждения в научных кругах [6–13]. Основными возникающими и нерешенными вопросами стали критерии квалификации персонала, достоверность получаемых данных, а также сама технологическая модель проведения процедуры диагностирования в условиях машиностроительных и ремонтных предприятий. Таким образом, целью настоящего исследования является рассмотрение поэтапной процедуры подготовки производства для проведения процедуры ПСС тягового и нетягового подвижного состава, эксплуатирующегося

на инфраструктуре ОАО «РЖД» на предприятиях машиностроительного и ремонтного комплекса по результатам ТД.

Полученная по результатам исследования процессная расширенная модель бизнес-процесса — алгоритма формирования сетевого плана работ по технической подготовке производства (далее — ТПП) с учетом обеспечения норм и требований безопасности движения и надежности позволит исключить обращение на железнодорожной инфраструктуре транспортных средств, не соответствующих нормативным требованиям [14, 15].

Основным преимуществом проведения процедуры установления ННСС для подвижного состава является снижение инвестиционных затрат собственника на приобретение нового транспортного объекта в случае, если его фактический остаточный ресурс не достиг перехода его в предельное техническое состояние. Такие ресурсы в подвижном составе, как правило, накапливаются при использовании на малодеятельных участках, в щадящих режимах или низкой интенсивности использования. Однако эксплуатация на напряженных участках или с наличием сложных профилей не говорит, что фактическое состояние объекта достигнет предельного состояния при наступлении у данной единицы подвижного состава календарного срока службы.

Одним из требований возможности ПСС является выполнение требований пункта 11 статьи 4 [1], который требует: «в случае внесения изменений в конструкцию или технологию изготовления железнодорожного подвижного состава и (или) его составных частей, влияющих на безопасность, а также при модернизации с ПСС, должно быть проведено обязательное подтверждение соответ-

ствия продукции в порядке, установленном в статье 6 настоящего технического регламента ТС». Таким образом, данное требование размывает границы между процедурой модернизации и процедурой ПСС.

Данное требование вызывает необходимость проведения модернизации подвижного состава с обязательным прохождением сертификационных испытаний.

Из примера чехословацкого локомотива серии ЧС2, получившего после КР с ПСС на Ярославском ЭРЗ им. Б. П. Бещева индекс «К», следует, что по состоянию на август 2019 года в парке ОАО «РЖД» оставалось 13 электровозов данной серии, которые имели возможность пройти процедуру ПСС без проведения КР с последующей сертификацией. Вместе с тем 113 локомотивов после проведения данной процедуры получили новую серию ЧС2К. Аналогичные изменения произошли и в Новочеркасском ВЛ10: после КР ПСС на Челябинском ЭРЗ индекс «К» получила 801 секция.

Однако процедуру ПСС могли пройти и другие серии локомотивов без проведения серьезных модернизационных вложений, так как данные работы требуют значительных инвестиционных и капитальных вложений, что делает данный проект экономически непривлекательным.

Таким образом, изменение существующих нормативных норм позволят гармонизировать и обеспечить выполнение требований [5] в полном объеме, что в конечном счете в перспективе до 2030 года позволит сократить выбывание ТПС с 6714 до 4478 ед. — на 2236 ед. (электровозы серий ВЛ-65, ВЛ-80 в/и, ВЛ-85, ЧС-4Т, ЧС-6, ЧС-7, ЧС-8; — тепловозы серий 2ТЭ116 в/и, 2(3) ТЭ10 в/и, 2(3) М62 в/и, ТЭП-70, ТЭМ-2в/и, ТЭМ-7 в/и, ЧМЭ-3 в/и) и НТПС с 1048 до 74 ед. — на



974 ед. (вагоны моделей 47 к/к, 47к, 61–825, 61–828, 61–850, 61–4444, 61–4189, 61–4193, 61–4186).

Следует понимать, что ПСС железнодорожного подвижного состава требует особого подхода, прежде всего в части обеспечения безопасности перевозочного процесса. Остаточный ресурс определялся исходя из результатов ТД наиболее подверженных повреждаемости несущих и ответственных базовых элементов (рамы, тележки и кузов, несущих элементы силового каркаса). Так, в **ЛОКОМОТИВНОМ ХОЗЯЙСТВЕ** ТД основывается на результатах проводимой специализированной организацией экспертизы, по итогам которой собственнику ТПС выдается заключение (техническое решение) с рекомендациями о необходимом объеме восстановительных работ. Формирование заключения основывается на результатах технического и неразрушающего контроля (далее — НК) [15].

В **Пассажи́рском хозяйстве** ТД проводится комиссионно силами работников ремонтных предприятий в соответствии с методикой [4] и последующей оценкой остаточной толщины металла в несущих элементах силового каркаса, согласно [20] и контроля сварных швов и соединений с применением ультразвукового вида (метода) НК (далее — НК) [21–23]. По его результатам оформляется заключение о возможности дальнейшего использования исследуемой единицы подвижного состава. НК — источник объективной информации о фактическом техническом состоянии ТПС и НТПС, а также их составных частей. НК узлов и деталей подвижного состава проводится с целью освидетельствования целостности узлов и деталей и выявления в них зарождающихся дефектов для своевременного проведения ремонта или утилизации. Данные процедуры контроля

также напрямую влияют на безопасность движения поездов и повышения экономической эффективности эксплуатируемого локомотивного и вагонного парков (за счет сокращения затрат, связанных с неплановыми ремонтами и сокращением времени простоя локомотивов и вагонов в ремонте) путем своевременного выявления недопустимых эксплуатационных дефектов. Виды (методы) НК определяются в зависимости от их эффективности и указываются в соответствующей ремонтной документации (далее — РД). Контроль деталей и узлов локомотивов и вагонов включает следующие виды (методы) контроля: визуально-измерительный, ультразвуковой, магнитопорошковый, вихретоковый и др. [15–19].

Применение методов НК дают положительные результаты: на предприятиях локомотиворемонтного комплекса за 2021 год сервисными локомотиворемонтными компаниями проконтролировано 5 094 577 деталей, из которых 21 489 забраковано. Так, в «ЛокоТех» забраковано 18 945 (0,5%), из 3 984 248 проконтролированных. За аналогичный период 2020 года процент браковки также составил 0,5% (забраковано 24 200 из 4 981 375 проконтролированных). В «СТМ-Сервис» за 2021 год проконтролировано 1 110 329 деталей, из них забраковано 2 544 (0,2%). В 2020 году процент отбраковки составил 0,4% (проконтролировано 1 235 090 деталей, забраковано 5 496). В табл. 1 приведены сравнительные данные по отбраковке деталей локомотивов за период 2007–2021 годов.

Согласно анализу проведения НК за последние 15 лет установлено, что наиболее высокий уровень отбраковки за рассматриваемый период сохраняется по колесным центрам, зубчатым колесам и маятниковым подвескам (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные данные по отбраковке деталей локомотивов за 15 лет

Узел	Деталь	Уровень отбраковки, %														
		2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
КРБ, КМБ	Ось	1,47	1,77	1,45	1,7	1,55	1,34	1,24	1,14	1,01	0,88	0,61	0,60	0,58	0,45	0,41
	Бандаж колеса	0,34	0,28	1,89	1,63	0,31	0,26	0,23	0,24	0,19	0,12	0,13	0,11	0,17	0,08	0,10
	<b>Колесный центр</b>	<b>2,6</b>	<b>3,36</b>	<b>2,7</b>	<b>3,29</b>	<b>3,44</b>	<b>4,24</b>	<b>3,89</b>	<b>4,04</b>	<b>4,34</b>	<b>3,62</b>	<b>2,99</b>	<b>2,78</b>	<b>5,30</b>	<b>4,08</b>	<b>4,07</b>
	Удлиненная ступица	1,47	1,31	1,7	1,54	1,73	1,85	1,51	1,24	1,28	1,08	1,34	1,20	1,08	1,15	1,04
	<b>Зубчатое колесо</b>	<b>3,77</b>	<b>4,24</b>	<b>3,87</b>	<b>3,86</b>	<b>3,78</b>	<b>4,05</b>	<b>3,69</b>	<b>3,36</b>	<b>2,76</b>	<b>2,66</b>	<b>2,19</b>	<b>2,03</b>	<b>3,39</b>	<b>2,84</b>	<b>2,07</b>
	Шестерня	4,22	3,45	3,9	4,37	3,62	3,57	2,93	2,76	2,71	2,48	2,25	1,89	2,10	1,84	1,68
	Вал малой шестерни	1,25	1,41	1,6	1,14	0,61	0,64	0,49	0,42	0,55	0,82	1,15	0,17	0,15	0,11	0,08
	Валы якоря	0,9	1,08	1,66	1,78	1,01	0,89	1,46	1,21	1,17	0,69	1,44	1,33	0,63	0,57	0,95
	Корпус автосцепки	2,03	1,74	1,45	1,93	2,1	2,24	1,5	1,46	1,62	1,64	1,24	1,03	1,69	1,07	1,43
	Тяговый хомут	4,22	3,93	3,28	3,67	3,6	3,7	3,43	2,75	2,27	2,76	2,37	2,00	2,22	1,58	2,45
Автосцепное устройство	Клин хомута	1,03	0,94	0,91	1,1	0,83	0,72	0,71	0,9	0,73	0,58	0,56	0,64	0,73	0,68	0,59
	<b>Маятниковая подвеска</b>	<b>3,53</b>	<b>2,93</b>	<b>3,4</b>	<b>3,99</b>	<b>3,83</b>	<b>4,49</b>	<b>3,59</b>	<b>3,74</b>	<b>3,09</b>	<b>3,88</b>	<b>3,09</b>	<b>2,98</b>	<b>3,28</b>	<b>2,95</b>	<b>3,06</b>
	Внутренние и наружные кольца	0,84	0,86	0,96	1,0	0,7	1,01	1,54	0,74	0,61	0,43	0,39	0,36	0,29	0,30	0,27
	Ролики	0,74	0,51	0,52	0,55	0,52	0,5	1,27	0,25	0,29	0,33	0,29	0,46	0,91	0,31	0,13
Дизель	Детали дизеля в целом	1,23	1,26	1,28	1,35	1,33	1,38	1,22	1,51	1,92	1,85	2,00	1,23	1,08	0,98	1,10
	Детали компрессора в целом	0,81	0,71	0,78	1,0	1,4	1,16	0,68	1,16	0,56	0,41	0,17	0,05	0,29	0,17	0,09
Компрессор	Детали подвесок в целом	0,81	0,8	0,82	0,7	0,94	0,7	0,51	0,45	0,56	0,49	0,12	0,26	0,78	0,35	0,10
	Другие узлы	0,63	0,55	0,5	0,62	0,47	0,59	0,49	0,74	0,38	0,39	0,42	0,28	0,20	0,25	0,30
Среднесетевой уровень отбраковки		0,98	0,92	0,95	1,02	0,87	0,92	1,07	0,79	0,72	0,69	0,60	0,50	1,4	0,46	0,42

\* Примечание. Уровень отбраковки — процентное соотношение количества забракованных деталей колесных пар локомотивов к количеству проверенных деталей.

По результатам проведенного НК 112 рам тележек локомотивов определены зоны, наиболее подверженные износу и образованию в них дефектов (усталостных трещин металла и др.), сварные швы и околошовная зона, которые схематически представлены на рис. 3. Важность полученных результатов позволяет реализовать ряд профилактических мер, таких как дополнительная обработка, упрочнение или профилактический контроль, для продления срока службы основных его элементов и единицы тягового подвижного состава в целом.

По итогам ТД 226 пассажирских вагонов в соответствии с методикой [4] постройки КВЗ в 1993–1994 годах забраковано 39 вагонов (17% от общего количества), в силовых элементах каркаса вагона выявлены сверхнормативные очаги коррозионного и иного воздействия (табл. 2).

Таким образом, структура выявленных коррозионных и иных утонений силового каркаса пассажирского вагона постройки КВЗ представлена на рис. 4.

ТАБЛИЦА 2. Количество выявленных несоответствий толщин металла при проведении исследований вагонов КВЗ

Элемент вагона	Вагон модели 61-850	Вагон модели 61-836	Всего измерений
Хребтовая балка с котловой стороны	3	23	234
Хребтовая балка с некотловой стороны	9	19	234
Хребтовая балка, средняя часть	2	1	117
Шкворневая балка с котловой стороны	9	29	117
Шкворневая балка с некотловой стороны	4	31	117

Проведенный сравнительный анализ показывает, что зоны, наиболее подверженные коррозионному износу и образованию дефектов (усталостных трещин металла и др.), сосредоточены в сварных швах и околошовной зоне, а также на недостаточно защищенных

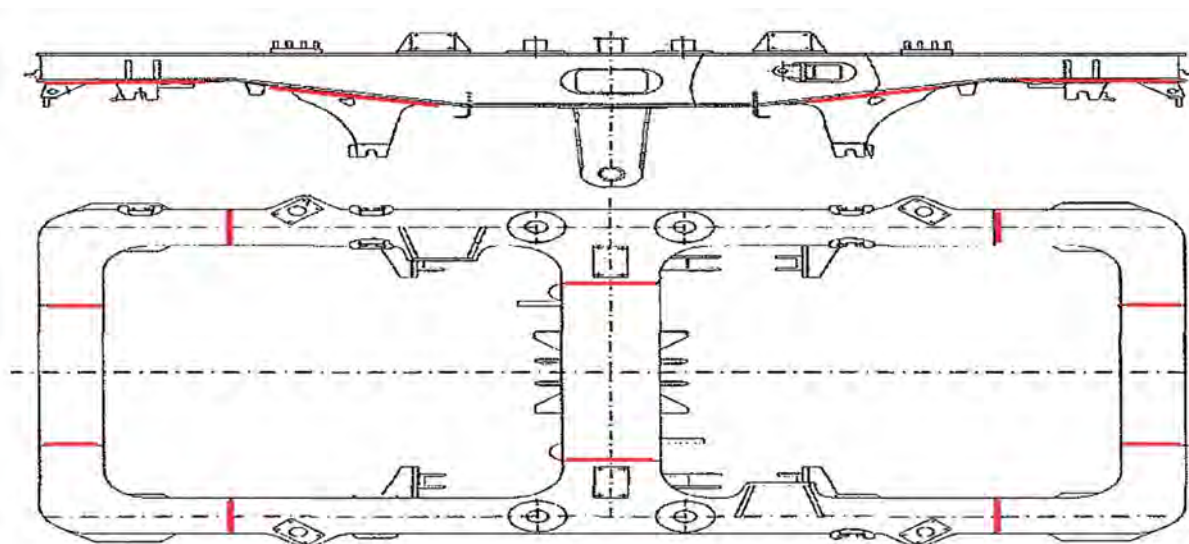
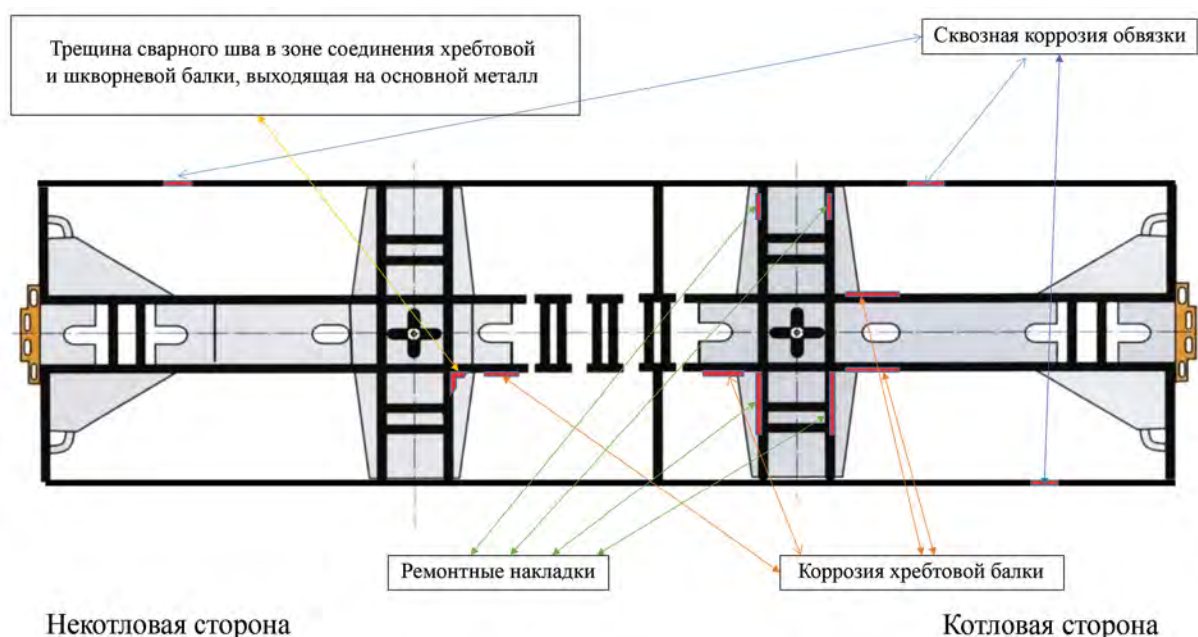


Рис. 3. Внешний вид рамы тележки и зоны наиболее вероятного образования дефектов (отмечены красным цветом)



**Рис. 4.** Результаты наличия сверхнормативных утонений толщин силового каркаса пассажирского вагона, достигшие нормативного срока службы

от воздействия окружающей среды и внешних факторов участках силового каркаса рамы. Таким образом, процедура установления ННСС (ресурса) подвижного состава и его составных частей определяется оценкой исследуемой единицы фактического остаточного потенциала и наступлением прогнозируемого срока перехода его в предельное состояние по результатам проведенной научно-исследовательской работы (далее — НИР), в отличие от ПСС.

Следовательно, при достижении исследуемым объектом предельного состояния (назначенного ресурса), установленного в регламентной документации, собственником может быть инициировано проведение оценки целесообразности дальнейшего использования, по результатам которой принимается решение о проведении восстановительного ремонта или утилизации объекта.

При ННСС [3] подвижному составу и его составным частям собственник в со-

ответствии с ранее предложенной моделью бизнес-процесса (алгоритм формирования сетевого плана работ по ТПП [14]) инициирует необходимые операции и работы, обеспечивающие подготовку и освоение производства.

Общий порядок проведения работ по ННСС можно разделить на следующие этапы: проведение научно-исследовательской работы (НИР); разработка РД; подготовка производства (проведение опытного диагностирования, ремонта, испытаний, приемки результатов разработки РД и оценка качества проведенного ремонта опытного образца, освоение серийного ремонта, подконтрольная эксплуатация отремонтированных изделий на подвижном составе или опытной партии подвижного состава).

1. НИР, по мнению авторов, должна проводить специализированная аккредитованная на право приведения и установления ННСС организация, наделенная этим правом на

законодательном уровне. Данная организация должна иметь необходимое технологическое и испытательное (диагностическое) оборудование, средства измерения, настроечные образцы и прочие материально-технические ресурсы, необходимые и достаточные для выполнения исследований, а также производственную базу [3].

2. Уполномоченный представитель собственника подвижного состава на основании данных НИР организует разработку комплекта РД на ремонт подвижного состава в соответствующем объеме (например, средний, деповской или капитальный ремонт (далее — СР, ДР, КР соответственно) согласно ГОСТ 2.602–2013 [24] с разработкой новых эксплуатационных документов на тип или серию подвижного состава, согласно требованиям ГОСТ Р 2.601–2019 [25], на основании которых разрабатывается технологическая документация (далее — ТД) для организации опытного ремонта единицы подвижного состава.

3. Ремонтное структурное подразделение начинает подготовку предприятия, проводя предварительные и приемочные испытания образцов подвижного состава, на основании которых утверждается комплект КД на ДР, СР или КР, требуемый для проведения соответствующего вида ремонта. Также ремонтное структурное подразделение готовит комплект документации, в котором отражаются параметры ННСС, пороги допустимых отказов и критических состояний согласно требованиям ГОСТ 27.003–2016 [26]. Общий порядок не учитывает непрерывное усложнение самих конструкций подвижного состава.

Предложенная процессная расширенная модель [14] бизнес-процесса — алгоритм формирования сетевого плана работ по ТПП при постановке на производство единицы подвижного состава с целью проведения

ННСС подвижному составу — структурирована на рис. 5. Основной целью ТПП является разработка оптимального технологического процесса, который обеспечит ремонт подвижного состава заданного качества и с минимальными затратами.

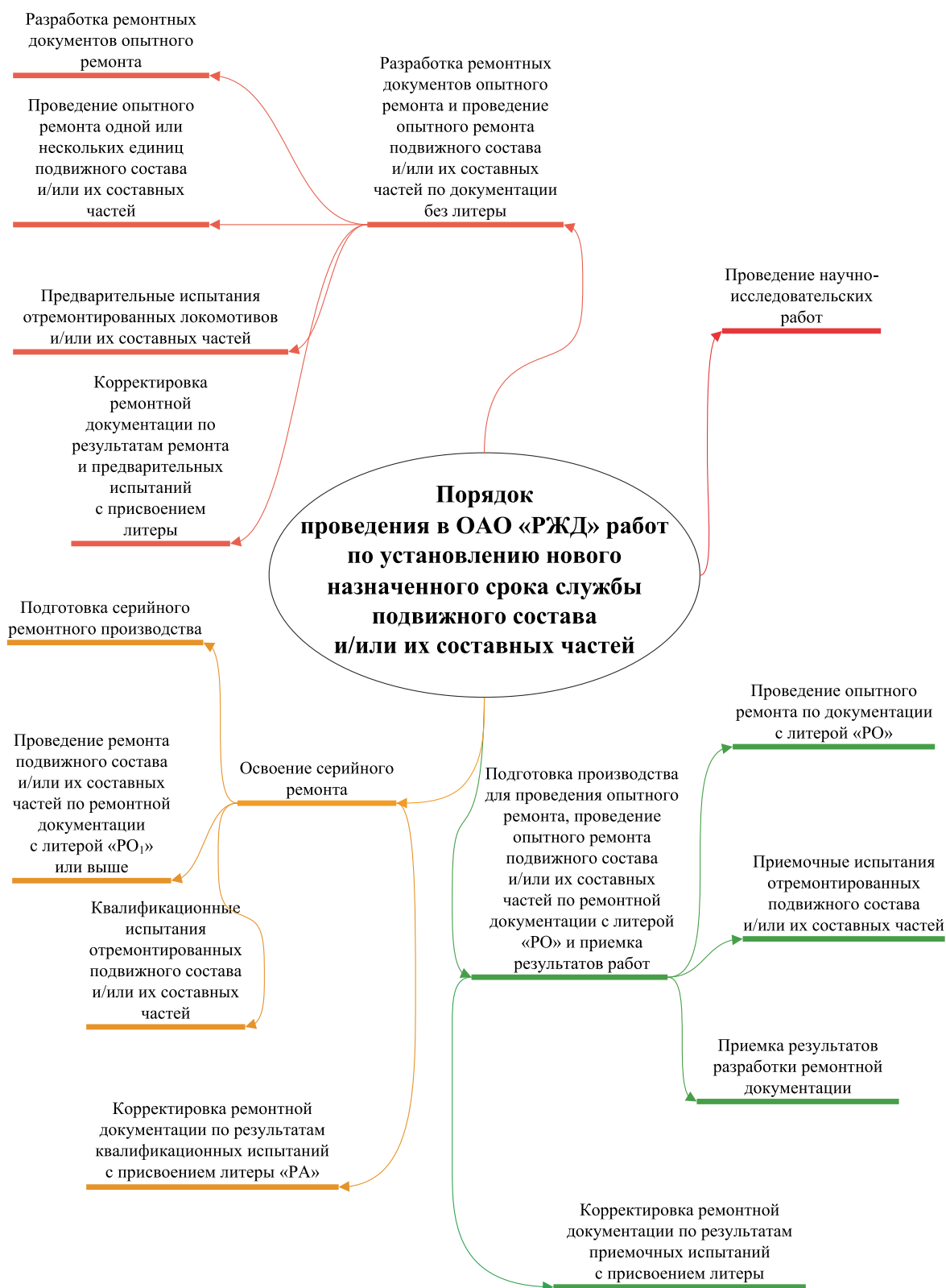
Рассмотрим этапы подготовки производства. На текущем этапе уполномоченный представитель собственника подвижного состава передает комплект РД без литеры, утвержденный в установленном порядке [3, 14]. На основании данных документов осуществляется разработка КД для опытного ремонта одной или нескольких единиц серии (модели) подвижного состава с целью обеспечения соответствия ремонта предъявляемым требованиям. Данный этап включает в себя следующие основные работы: обработка полученной КД на технологичность, разработка недостающих фрагментов КД и РД, формирование графика инвестиционной программы (далее — ГИП) приобретения необходимого оборудования, приобретение оборудования в рамках утвержденной ГИП, разработка ведомости РД, определение маршрута ремонта элементов подвижного состава, подача заявок на приобретение товарно-материальных ресурсов (далее — ТМР), заключение договоров поставки ТМР [3, 14].

Началом испытаний является наличие следующих документов: утвержденные программы и методики предварительных испытаний; уведомление (или иной документ, его заменяющий) ремонтной организации о проведении опытного ремонта одной или нескольких единиц подвижного состава [3, 14]. Возможно совмещение программы и методики испытаний в одном документе.

Основные этапы проведения работ по ННСС подвижному составу и (или) их составным частям представлены на рис. 6.



**Рис. 5.** Процессная расширенная модель [14] по организации работ по установлению ННСС подвижному составу или его элементной базе



**Рис. 6.** Основные этапы проведения работ по ННСС подвижному составу и (или) его составным частям

Так, предварительные испытания считаются завершенными после утверждения протоколов и подписания акта комиссионной приемки и выдачи заключения о возможности организации данного ремонта подвижного состава по РД с литерой «РО» (при необходимости их корректировку по итогам проведенного ремонта и испытаний с присвоением литеры «РО», а также корректировку ЭД).

При подготовке отдельно можно выделить подготовку ремонтного производства в структурном подразделении [13], включающую в себя анализ технологической оснащенности (анализ имеющегося и недостающего оборудования, в том числе испытательного, технологической оснастки, инструмента и средств измерения), проведение выборочного соблюдения технологической дисциплины ремонта подвижного состава на производственных участках и принятие заключения по итогам испытаний.

По результатам проведенного исследования целесообразно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что снятие ограничений позволит осуществлять процедуру установления ННСС подвижному составу без значительных инвестиционных и капитальных затрат. Данное исследование также предлагает актуализировать НТД, предусмотрев возможность проведения повторной процедуры ПСС подвижному составу, проходивший их ранее. В существующих условиях ПСС железнодорожным объектам (тепловозам, паровозам, электровозам, пассажирским вагонам различных моделей и т. п.) позволит также избежать обязательного вывода из эксплуатации объектов, имеющих фактический остаточный технический ресурс. В перспективе до 2030 года эффект от снижения выбытия

парка по причине достижения назначенного срока службы составит 3210 единиц подвижного состава (с 7762 до 4552).

2. Рассмотрен общий порядок проведения работ по ННСС подвижному составу и его составным частям. Отмечено, что одним из основных этапов является ТПП на предприятии.

3. Предложена расширенная модель ТПП, позволяющая раскрыть любой процесс на производстве не только со стороны управляющего влияния и обеспечения его ТМР, технической документацией, квалифицированными сотрудниками, но и со стороны верификации технологии выполнения операций.

4. Исследование технического состояния элементной базы подвижного состава позволили установить наибольшие снижающие критерии долговечности элементной базы подвижного состава, позволяющие своевременно приложить дополнительные профилактические меры для сохранения его остаточного ресурса на эксплуатационном этапе жизненного цикла.

5. Отмечены пять основных направлений обеспечения легитимной эксплуатации подвижного состава по истечении его срока службы. Первый: внесение изготовителем подвижного состава (держателем подлинника) изменений в конструкторскую документацию (далее — КД) в части изменения срока службы. Второй: установление назначенного срока службы подвижного состава при его отсутствии в КД. Третий: проведение процедуры ТД подвижного состава, имеющего историческую ценность. Четвертый: проведение процедуры установления назначения нового срока службы (далее — ННСС). Пятый: проведение процедуры ПСС. Отмечено, что в настоящее время возможность ПСС подвижного состава ограничена.



**Библиографический список**

1. Технический регламент таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава». ТР ТС-001/2011. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2012. 47 с.
2. Временный порядок допуска комплектующих альтернативных источников и внесения изменений в конструкторскую документацию на локомотивы. 1746/р от 04.07.2022. М.: ОАО «РЖД». 2022. 12 с.
3. Порядок проведения в ОАО «РЖД» работ по установлению нового назначенного срока службы локомотивов и их составных частей. 2269/р от 18.10.2018. М.: ОАО «РЖД», 2018. 28 с.
4. Методика технического диагностирования пассажирских вагонов моделей 61–817, 61–820, 61–828, 61–836, 61–850, утвержденная 21.11.2022 заместителем генерального директора — техническим директором ЗАО «ТИВ» А. Н. Скачковым. Тверь: Тверской институт вагоностроения, 2022. 18 с.
5. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 23.06.2022 № 250.
6. Аболмасов А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания: дис. ... канд. тех. наук. М.: Московский институт инженеров транспорта, 2017. 180 с.
7. Лакин И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов: дис. ... канд. тех. наук. М.: Московский институт инженеров транспорта, 2016. 195 с.
8. Липа К. В. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления / К. В. Липа, В. И. Гриненко, С. Л. Лянгасов и др. М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2013. 156 с.
9. Липа К. В. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский и др. М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. 212 с.
10. Липа К. В. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ-Сервис / К. В. Липа, В. И. Гриненко, С. Л. Лянгасов и др. М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2012. 160 с.
11. Progressive Railroading. Rail Insider-Rail technology: on-board locomotive monitoring. Information For Rail Career Professionals From Progressive Railroading Magazine [Электронный ресурс]. URL: [https://www. progressiverail-roading.com](https://www.progressiverail-roading.com) (дата обращения: 04.05.2022).
12. Рафиков Р. Х., Коновалов Н. Н., Лакин И. К. Совершенствование ультразвукового контроля. Разработка методики определения шага сканирования при ультразвуковом контроле // XXII Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов. Москва, 3–5 марта 2020 г. М.: Издательский дом «Спектр», 2020. С. 73–75.
13. Рафиков Р. Х., Коновалов Н. Н., Лакин И. К. и др. Оценка возможности замены на ультразвуковой радиационный контроль сварных соединений, деталей и узлов тягового подвижного состава // XXII Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов. Москва, 3–5 марта 2020 г. М.: Издательский дом «Спектр», 2020. С. 70–73.
14. Киреев А. Н., Дмитриенко А. Б., Атрошенко Д. В. Порядок постановки на производство подвижного состава и состава, эксплуатирующегося на инфраструктуре ОАО «РЖД», машиностроительным предприятием (изготовителем) по конструкторской документации другого разработчика // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2021. № 6 (48). С. 76–80.
15. Рафиков Р. Х., Куликов М. Ю. Технологическая подготовка производства при освоении ремонта локомотивов // Транспортное машиностроение. 2022. № 8. С. 33–43. DOI: 10.30987/2782–5957–2022–8–33–43.
16. Порядок продления назначенного срока службы локомотивов на основании положения: «Ло-

комотивы. Порядок продления назначенного срока службы» П. 15.01–2009, утвержденного на 53-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества от 20–21 октября 2010 г. [Электронный ресурс]. URL: [https://e-ecolog.ru/docs/HLtwTW7NlyPqWT5t6ZY4C?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://e-ecolog.ru/docs/HLtwTW7NlyPqWT5t6ZY4C?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (дата обращения: 16.10.2023).

17. Науменко А. П. НЗ4 Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль: учеб. пособие / А. П. Науменко; Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. 152 с.

18. ПР НК В. 2012 «Правила по неразрушающему контролю вагонов, их деталей и составных частей при ремонте. Общие положения». Приложение А «Положение об аттестации лабораторий неразрушающего контроля» (утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 16–17 октября 2012 г. № 57, приняты к руководству и исполнению Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 31 октября 2012 г. № 391) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71286746/> (дата обращения: 17.10.2023).

19. Положение об аттестации лабораторий неразрушающего контроля предприятий, осуществляющих ремонт локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава. Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества (протокол от 4–5 ноября 2015 г. № 63, принято к руководству и исполнению Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 1 декабря 2015 г. № 346).

20. Временный порядок организации работ по аттестации лабораторий неразрушающего контроля предприятий, выполняющих работы по изготовлению, ремонту и техническому обслуживанию железнодорожного подвижного состава. Утвержден от 21 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. URL:

<https://base.garant.ru/71927922/> (дата обращения: 16.10.2023).

21. Положение о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении (приложение № 46 к Протоколу от 21–22 октября 2014 г. № 61, утвержденному Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/70791874/9f26cdf39a65c84265eb766571cbfd90/> (дата обращения: 16.10.2023).

22. Система неразрушающего контроля в АО «ФПК». Контроль неразрушающих деталей пассажирских вагонов. Общие положения. СТО ФПК 1.11.004–2020. М., 54 с.

23. Типовое положение по организации работ по неразрушающему контролю на заводах Дирекции «Желдорремаш». РД ЖДРМ-01005 от 29.08.2005. М.: Желдорремаш, 32 с.

24. ГОСТ 2.602–2013. Единая система конструкторской документации. Ремонтные документы. М.: Стандартиформ, 2014. 20 с.

25. ГОСТ Р 2.601–2019. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы. М.: Стандартиформ, 2021. 36 с.

26. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила. Задания требований по надежности. М.: Стандартиформ, 2018. 19 с.

Дата поступления: 18.12.2023

Решение о публикации: 07.02.2024

#### **Контактная информация:**

РАФИКОВ Рафик Хайдарович — канд. техн. наук; rafis-89@mail.ru

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

ГОРЮНОВ Николай Александрович — аспирант; nikolay2gor@yandex.ru

## The procedure for putting into production traction and non-traction rolling stock and their elemental base, operated on the infrastructure of JSC Russian Railways, by enterprises of the machine-building and repair complex in order to establish a new assigned service life for them

R. Kh. Rafikov, A. S. Shinkaruk, N. A. Goryunov

Russian University of Transport (RUT (MIIT), build. 9, 9, st. Obraztsova, Moscow, 127994, Russia

**For citation:** *Rafikov R. Kh., Shinkaruk A. S., Goryunov N. A.* The procedure for putting into production traction and non-traction rolling stock and their elemental base, operated on the infrastructure of JSC Russian Railways, by enterprises of the machine-building and repair complex in order to establish a new assigned service life for them // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 125–141. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-125-141

### Abstract

**Objective:** consider the procedure for existing procedures for assessing rolling stock for the possibility of extending its actual service life using existing methods. To study the current procedures for extending the service life of locomotives and passenger cars by actually assessing the technical condition of each unit of rolling stock by conducting technical diagnostics on it, based on the results of which a decision is made to set a new assigned period (resource). **Methods:** comparison of procedures for extending the service life of traction and non-traction rolling stock. Assessment and identification of elements of traction rolling stock and locomotive-hauled passenger cars most susceptible to corrosion and fatigue failure. Analysis of the existing regulatory and technical framework and procedures for diagnosing locomotives and passenger cars for a possible decision on whether to carry out the procedure for extending the actual service life. **Result:** the reasons for limiting the procedure for establishing a new assigned service life for rolling stock have been established and scientifically based proposals for updating regulatory documents have been given. An extended model of technical preparation of production is proposed, taking into account the consideration of the main system stages. The areas most susceptible to wear and tear during the operational period have been identified in order to carry out preventive measures to eliminate them in a timely manner. Five main directions have been formed to ensure the legitimate operation of rolling stock upon expiration of its service life and obtaining a result on the possibility of its further use. **Practical significance:** creation of a procedure for establishing a new assigned service life (resource) for rolling stock, allowing structural enterprises of locomotive and passenger complexes to ensure interaction with their developers and manufacturers regarding the implementation of this process.

**Keywords:** technical preparation of production, repair documentation, traction and non-traction rolling stock, qualification commission.

## References

1. Tehnicheskij reglament tamozhennogo sojuza "O bezopasnosti zheleznodorožhnogo podvizhnogo sostava". TR TS-001/2011. Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj institut standartizacii i sertifikacii, 2012. 47 s. (In Russian)
2. Vremennyj porjadok dopuska komplektujushhich al'ternativnyh istochnikov i vnesenija izmenenij v konstruktorskiju dokumentaciju na lokomotivy. 1746/r ot 04.07.2022. M.: OAO "RZhD". 2022. 12 s. (In Russian)
3. Porjadok provedenija v OAO "RZhD" rabot po ustanovleniju novogo naznachennogo sroka sluzhby lokomotivov i ih sostavnyh chastej. 2269/r ot 18.10.2018. M.: OAO "RZhD", 2018. 28 s. (In Russian)
4. Metodika tehničeskogo diagnostirovanija pasażirskih vagonov modelej 61–817, 61–820, 61–828, 61–836, 61–850, utverzhdannaja 21.11.2022 zameshtitelem general'nogo direktora — tehničeskim direktorom ZAO "TIV" A. N. Skachkovym. Tver': Tverskoj institut vagonostroenija, 2022. 18 s. (In Russian)
5. Pravila tehničeskogo jekspluatacii zheleznih dorog Rossijskoj Federacii, utverzhdennye prikazom Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii ot 23.06.2022 № 250. (In Russian)
6. Abolmasov A. A. Upravlenie tehničeskimi sostojanijem tjažovogo podvizhnogo sostava v uslovijah servisnogo obsluzhivanija: dis. ... kand. teh. nauk. M.: Moskovskij institut inženerov transporta, 2017. 180 s. (In Russian)
7. Lakin I. I. Monitoring tehničeskogo sostojanija lokomotivov po dannym bortovyh apparatno-programmnyh kompleksov: dis. ... kand. teh. nauk. M.: Moskovskij institut inženerov transporta, 2016. 195 s. (In Russian)
8. Lipa K. V. Monitoring tehničeskogo sostojanija lokomotivov po dannym bortovyh mikroprocessornyh sistem upravlenija / K. V. Lipa, B. I. Grinenko, S. L. Ljangasov i dr. M.: OOO "TMH-Servis", 2013. 156 s. (In Russian)
9. Lipa K. V. Monitoring tehničeskogo sostojanija i rezhimov jekspluatacii lokomotivov. Teorija i praktika / K. V. Lipa, A. A. Belinskij i dr. M.: OOO "Lokomotivnye Tehnologii", 2015. 212 s. (In Russian)
10. Lipa K. V. Avtomatizirovannaja sistema upravlenija nadežnost'ju lokomotivov (ASUNT). koncepcija TMH-Servis / K. V. Lipa, V. I. Grinenko, S. L. Ljangasov i dr. M.: OOO "TMH-Servis", 2012. 160 s. (In Russian)
11. Progressive Railroading. Rail Insider-Rail technology: on-board locomotive monitoring. Information For Rail Career Professionals From Progressive Railroading Magazine [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.progressiverail-roading.com> (data obrashhenija: 04.05.2022). (In Russian)
12. Rafikov R. H., Konovalov N. N., Lakin I. K. Sovershenstvovanie ul'trazvukovogo kontrolja. Razrabotka metodiki opredelenija shaga skanirovanija pri ul'trazvukovom kontrole // XXII Vserossijskaja nauchno-tehničeskaja konferencija po nerazrushajushemu kontrolju i tehničeskogo diagnostike: sbornik trudov. Moskva, 3–5 marta 2020 g. M.: Izdatel'skij dom "Spektr", 2020. S. 73–75. (In Russian)
13. Rafikov R. H., Konovalov N. N., Lakin I. K. i dr. Ocenka vozmožnosti zameny na ul'trazvukovoj radiacionnoj kontroľ svarnyh soedinenij, detalej i uzlov tjažovogo podvizhnogo sostava // HXII Vserossijskaja nauchno-tehničeskaja konferencija po nerazrushajushemu kontrolju i tehničeskogo diagnostike: sbornik trudov. Moskva, 3–5 marta 2020 g. M.: Izdatel'skij dom "Spektr", 2020. S. 70–73. (In Russian)
14. Kireev A. N., Dmitrienko A. B., Atroshenko D. V. Porjadok postanovki na proizvodstvo podvizhnogo sostava i sostava, jekspluatirujushhego na infrastrukture OAO "RZhD", mashinostroitel'nym predprijatijem (izgotovitelem) po konstruktorskoj dokumentacii drugogo razrabotchika // Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalja. 2021. № 6 (48). S. 76–80. (In Russian)
15. Rafikov R. H., Kulikov M. Ju. Tehnologičeskaja podgotovka proizvodstva pri osvoenii remonta lokomotivov // Transportnoe mashinostroenie. 2022. № 8. S. 33–43. DOI: 10.30987/2782–5957–2022–8–33–43. (In Russian)
16. Porjadok prodlenija naznachennogo sroka sluzhby lokomotivov na osnovanii polozhenija: "Lokomotivy. Porjadok prodlenija naznachennogo sroka sluzhby" P. 15.01–2009, utverzhdenno na 53-m zase-

danii Soveta po zhelezнодорожному транспорту gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva ot 20–21 oktjabrja 2010 g. [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://e-ecolog.ru/docs/HLtwTW7NlyPqWT5t6ZY4C?utm\\_referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://e-ecolog.ru/docs/HLtwTW7NlyPqWT5t6ZY4C?utm_referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (data obrashhenija: 16.10.2023). (In Russian)

17. Naumenko A. P. N34 Vvedenie v tehničeskiju diagnostiku i nerazrushajushhij kontrol': ucheb. posobie / A. P. Naumenko; Minobrnauki Rossii, OmGTU. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2019. 152 s. (In Russian)

18. PR NK V. 2012 “Pravila po nerazrushajushhemu kontrolju vagonov, ih detalej i sostavnyh chastej pri remonte. Obshhie polozhenija”. Prilozhenie A “Polozhenie ob attestacii laboratorij nerazrushajushhego kontrolja” (utverzhdeno Sovetom po zhelezнодорожному транспорту gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 16–17 oktjabrja 2012 g. № 57, prinjaty k rukovodstvu i ispolneniju Prikazom Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii ot 31 oktjabrja 2012 g. № 391) [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://base.garant.ru/71286746/> (data obrashhenija: 17.10.2023). (In Russian)

19. Polozhenie ob attestacii laboratorij nerazrushajushhego kontrolja predpriyatij, osushhestvlajushhij remont lokomotivov i motor-vagonnogo podvizhnogo sostava. Utverzhdeno Sovetom po zhelezнодорожному транспорту gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva (protokol ot 4–5 nojabrja 2015 g. № 63, prinjato k rukovodstvu i ispolneniju Prikazom Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii ot 1 dekabrja 2015 g. № 346). (In Russian)

20. Vremennyj porjadok organizacii rabot po attestacii laboratorij nerazrushajushhego kontrolja predpriyatij, vypolnjajushhij raboty po izgotovleniju, remontu i tehničeskemu obsluzhivaniju zhelezнодорожного podvizhnogo sostava. Utverzhden ot 21 aprelja 2017 g. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://base.garant.ru/71927922/> (data obrashhenija: 16.10.2023). (In Russian)

21. Polozhenie o prodlenii sroka sluzhby passazhirskih vagonov, kursirujushhij v mezhdunarodnom soobshhenii (prilozhenie № 46 k Protokolu ot 21–22 oktjabrja 2014 g. № 61, utverzhdennomu Sovetom po zhelezнодорожному транспорту gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva) [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://base.garant.ru/70791874/9f26cdf39a65c84265eb766571cbfd90/> (data obrashhenija: 16.10.2023). (In Russian)

22. Sistema nerazrushajushhego kontrolja v AO “FPK”. Kontrol' nerazrushajushhij detalej passazhirskih vagonov. Obshhie polozhenija. STO FPK 1.11.004–2020. M., 54 s. (In Russian)

23. Tipovoe polozhenie po organizacii rabot po nerazrushajushhemu kontrolju na zavodah Direkcii “Zheldorremmash”. RD ZhDRM-01005 ot 29.08.2005. M.: Zheldorremmash, 32 s. (In Russian)

24. GOST 2.602–2013. Edinaja sistema konstruktorskoj dokumentacii. Remontnye dokumenty. M.: Standartinform, 2014. 20 s. (In Russian)

25. GOST R 2.601–2019. Edinaja sistema konstruktorskoj dokumentacii. Jekspluatacionnye dokumenty. M.: Standartinform, 2021. 36 s. (In Russian)

26. GOST 27.003–2016. Nadezhnost' v tehnike. Sostav i obshhie pravila. Zadanija trebovanij po nadezhnosti. M.: Standartinform, 2018. 19 s. (In Russian)

Received: 18.12.2023

Accepted: 07.02.2024

**Author's information:**

Rafik Kh. RAFIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; rafis-89@mail.ru

Andrey S. SHINKARUK — PhD in Engineering, Associate Professor; shinkarukas@mail.ru

Nikolay A. GORYUNOV — Postgraduate Student; nikolay2gor@yandex.ru

УДК 629.4.014, 624.9, 624.041.12

## Актуализация методики учета аэродинамического воздействия от поездов на высокоскоростных железнодорожных магистралях

Н. А. Лабутин<sup>1</sup>, Л. К. Дьяченко<sup>2</sup>, Е. Е. Луковников<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>1,2</sup> ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений», Россия, 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 113а

**Для цитирования:** Лабутин Н. А., Дьяченко Л. К., Луковников Е. Е. Актуализация методики учета аэродинамического воздействия от поездов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 142–155. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-142-155

### Аннотация

При расчете конструкций, расположенных вблизи железнодорожных путей (шумозащитных экранов вдоль путей, путепроводов над высокоскоростными железнодорожными магистралями (ВСМ), элементов пролетных строений с ездой понизу и т. д.), должны учитываться аэродинамические воздействия при движении высокоскоростных поездов. **Целью** настоящего исследования является изучение аэродинамического воздействия движущегося высокоскоростного поезда на сооружения и конструкции, расположенные в непосредственной близости от высокоскоростной железнодорожной магистрали с последующей корректировкой действующей нормативной базы для проектирования объектов инфраструктуры ВСМ. **Методами** исследования в настоящей работе являются математическое моделирование в специализированном программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики с экспериментальной верификацией разработанных расчетных моделей и последующим анализом и обобщением полученных результатов. **Результаты** исследования представлены картинками распределения и интенсивностями аэродинамического воздействия от движущегося высокоскоростного поезда для двух наиболее характерных расчетных случаев: воздействие на вертикальную поверхность, расположенную параллельно оси пути, и на горизонтальную поверхность, расположенную над осью движения поезда. Для рассматриваемых расчетных случаев были установлены зависимости интенсивности воздействия от таких параметров, как расстояние до конструкции от оси пути (для вертикальной поверхности) и высота над уровнем головки рельса (для горизонтальной поверхности). **Практическая значимость** настоящего исследования заключается в разработке предложений по корректировке и дополнению действующей нормативной базы для проектирования сооружений и конструкций, входящих в состав инфраструктуры высокоскоростных железнодорожных магистралей.

**Ключевые слова:** ВСМ, высокоскоростная магистраль, аэродинамика, аэродинамическое воздействие, высокоскоростной поезд, инфраструктура, объекты инфраструктуры.

### Введение

Разработка специальных технических условий (СТУ) для проектирования и строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 Санкт-Петербург — Москва обусловлена необходимостью учета при

проектировании некоторых специальных нагрузок и воздействий, учет которых недостаточно представлен в действующей нормативной базе. Одной из таких нагрузок является нагрузка от аэродинамического воздействия

высокоскоростного подвижного состава на объекты инфраструктуры магистрали [1–3].

Нагрузка от аэродинамического воздействия представляет собой «бегущую» знакопеременную воздушную волну из областей повышенного (избыточного) и пониженного (разреженного) давлений с резкой сменой их экстремальных значений. Особая значимость именно для объектов инфраструктуры ВСМ нагрузки от аэродинамического воздействия обусловлена квадратичной зависимостью давления, оказываемого воздушным потоком, от скорости генерируемого поездом ветрового потока, существенно превышающей скорость ураганного ветра [4–7].

### **Обзор ранее разработанной нормативной базы**

Впервые в России аэродинамическое воздействие от высокоскоростных поездов было отмечено в Указаниях по проектированию мостов для головного участка Ленинград — Москва высокоскоростной железнодорожной магистрали «Центр — Юг» с эксплуатационной скоростью до 300 км/ч, разработанных ЛИИЖТ в 1990 году [8]. Рост интенсивности аэродинамического взаимодействия между встречными поездами был компенсирован увеличением ширины междупутья до 5 м [9].

В 2007 году в рамках подготовки к организации высокоскоростного движения на существующей линии Санкт-Петербург — Москва ОАО «РЖД» был введен стандарт организации СТО 1.07.001-2007 «Инфраструктура линии Санкт-Петербург — Москва для высокоскоростного движения поездов. Общие технические требования», в котором было обозначено требование к учету нагрузки от аэродинамического воздействия объектами инфраструктуры линии.

Мощным импульсом развития исследования вопросов аэродинамического воздействия поездов послужила разработка специальных технических условий для проектирования и строительства ВСМ-2 Москва — Казань в 2014–2016 годах со скоростью движения до 400 км/ч [10]. Вследствие отсутствия отечественного опыта исследования аэродинамического воздействия в СТУ были заимствованы основные положения из европейских норм проектирования Eurocode EN 1991-2, ограниченные скоростями движения до 300 км/ч. В это же время ОАО «РЖД» была утверждена опытная методика расчета аэродинамического воздействия от высокоскоростных поездов при скоростях движения до 400 км/ч [11], в которой был расширен диапазон рабочих скоростей движения и введены коэффициенты, учитывающие распределение аэродинамического давления в различных расчетных случаях. В дальнейшем данная методика легла в основу рекомендаций по расчету аэродинамического воздействия, приведенных в СТУ для проектирования и строительства ВСЖМ-1 Санкт-Петербург — Москва.

### **Экспериментальные исследования аэродинамического воздействия**

Для ликвидации имеющегося дефицита в экспериментальных исследованиях аэродинамического взаимодействия подвижного состава и воздушной среды летом 2021 года специалистами Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС) были выполнены экспериментальные измерения аэродинамического воздействия на отдельных участках железной дороги Санкт-Петербург — Москва с установленными скоростями движения от 200 до 250 км/ч [11–12]. Работы выполнены специалистами кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО ПГУПС и ООО «Инженерное

бюро искусственных сооружений» совместно с сотрудниками мостоиспытательной станции № 1 Санкт-Петербургского центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры ОАО «РЖД». Для измерений были использованы высокочастотные мембранные датчики избыточного давления, устанавливаемые на штативах и прикрепляемые к различным объектам инфраструктуры. Процесс измерений представлен на рис. 1.

Результаты измерений были представлены графиками изменения во времени избыточного давления при прохождении подвижного состава. Пример полученной зависимости приведен на рис. 2.

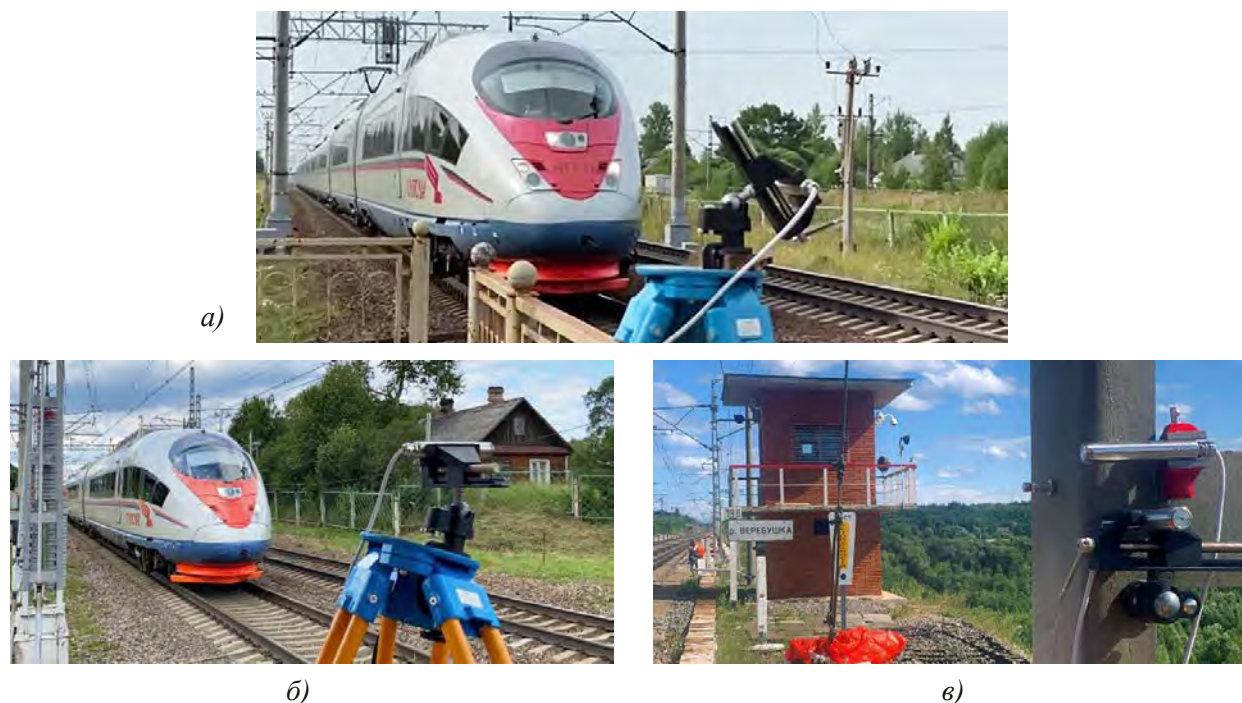
На основе полученных результатов были построены изополя распределения экстремальных величин избыточного давления вокруг поезда. Также был определен характер затухания интенсивности воздушного давле-

ния при удалении от оси пути для различных форм подвижного состава [12].

### Численное моделирование аэродинамического воздействия

В качестве рассматриваемых расчетных случаев аэродинамического воздействия, оказываемого движущимся высокоскоростным поездом, были рассмотрены два наиболее характерных случая: воздействие на горизонтальную и на вертикальную поверхности, расположенные параллельно оси пути.

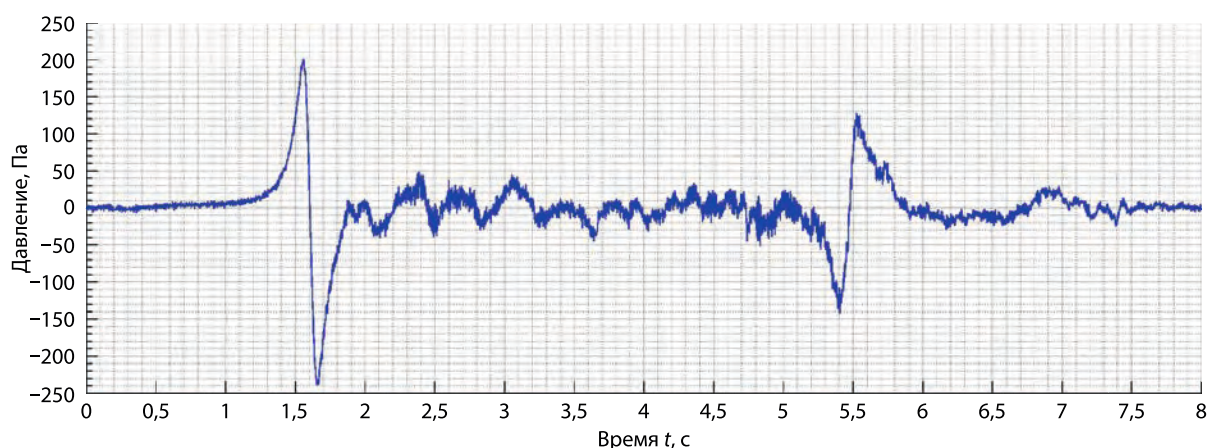
Исследование задач аэродинамического взаимодействия воздушной среды, подвижного состава и объектов инфраструктуры является крайне трудоемкой задачей при физическом моделировании на аэродинамических установках [14], так как возникающий поток генерируется непосредственно поездом, движущимся в воздушной среде.



**Рис. 1.** Рабочие моменты выполнения экспериментальных измерений  
 (а — пл. Саблино, б — ст. Мстинский Мост, в — 199-й км линии Санкт-Петербург — Москва).

Фотографии предоставлены авторами





**Рис. 2.** График изменения давления при проходе высокоскоростного поезда «Сапсан» со скоростью 250 км/ч

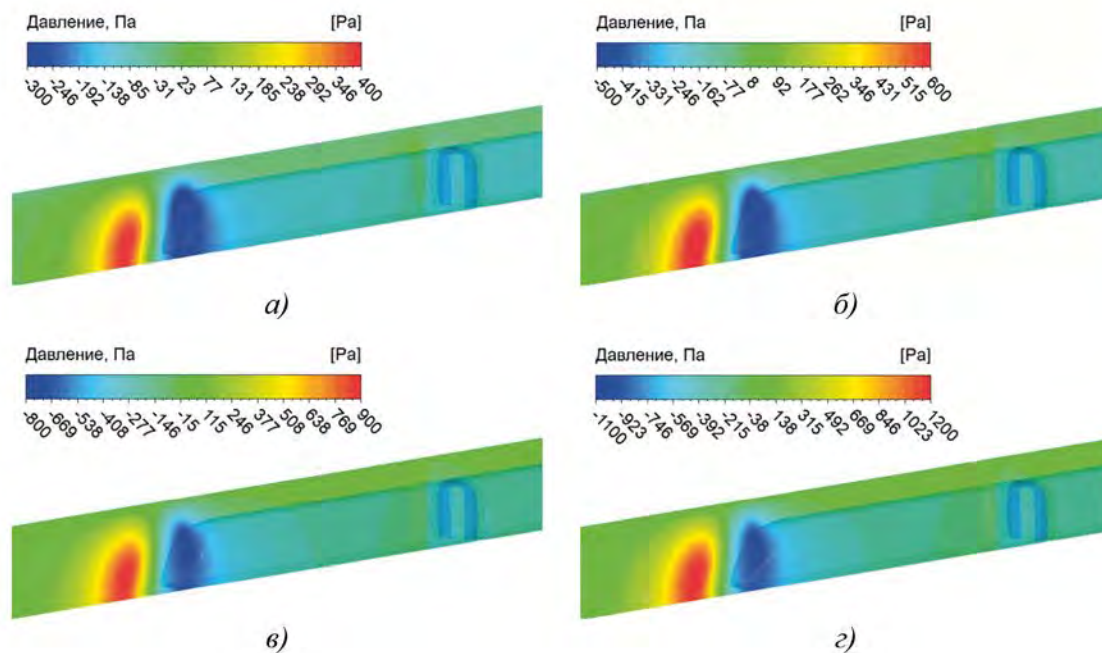
Таким образом, при решении рассматриваемых задач аэродинамического взаимодействия целесообразно прибегать к методам численного моделирования в программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Численное моделирование аэродинамических процессов основано на решении системы уравнений неразрывности воздушной среды, уравнений сохранения энергии и движения, дополняемых уравнениями моделей турбулентности воздушного потока [15]. Для численного моделирования был использован программный комплекс вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX с применением расчетных моделей, верифицированных по результатам выполненных экспериментальных измерений и демонстрирующих достаточно высокую степень достоверности получаемых результатов [16, 17].

В качестве расчетного поезда был принят высокоскоростной электропоезд «Сапсан» в трехвагонной компоновке (рис. 3), позволяющей в полной мере оценить воздействие хвостовой и концевой воздушных волн с существенной экономией вычислительных ресурсов вследствие сокращения размеров расчетной модели.

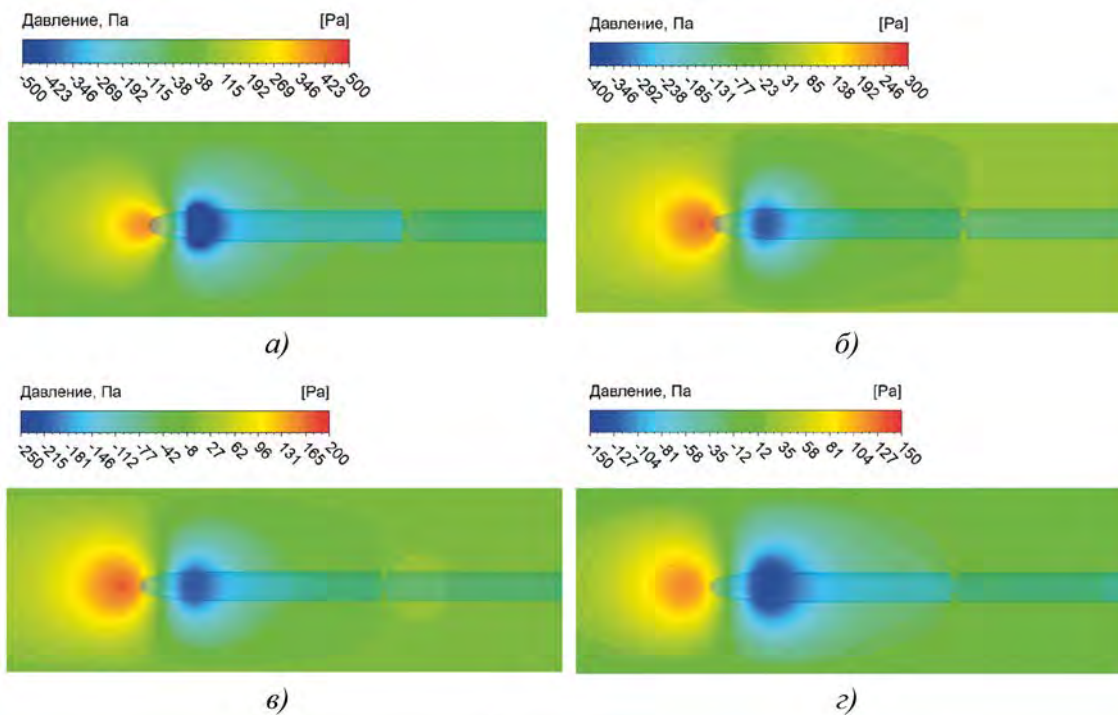
Для оценки величины и характера аэродинамического воздействия была выполнена последовательная серия расчетов на вертикальную поверхность, расположенную параллельно оси пути на расстоянии от 2,5 до 7,0 м от оси пути, и на вертикальную поверхность, расположенную над осью пути на высоте от 5,0 до 8,0 м над уровнем головки рельса (УГР). Полученные характерные изополя распределения давлений на вертикальную и горизонтальную поверхности приведены на рис. 4, 5.



**Рис. 3.** Расчетная модель высокоскоростного электропоезда «Сапсан»



**Рис. 4.** Распределение давлений на вертикальную поверхность, расположенную на расстоянии 2,5 м от оси пути, при скорости движения поезда:  
*a* — 200 км/ч; *б* — 250 км/ч; *в* — 300 км/ч; *г* — 350 км/ч



**Рис. 5.** Распределение давлений на горизонтальную поверхность при скорости движения поезда 250 км/ч и высоте поверхности над УГР: *a* — 5 м; *б* — 6 м; *в* — 7 м; *г* — 8 м

По результатам численного моделирования были получены графики распределения максимальных интенсивностей аэродинамического воздействия в зависимости от расстояния от оси пути и высоты над уровнем головки рельса (рис. 6).

### Разработка методики определения интенсивности эквивалентной нагрузки от аэродинамического воздействия

Величина аэродинамического воздействия определяется такими параметрами, как скорость поезда и его форма, геометрические характеристики и пространственное расположение конструкции относительно подвижного состава, и может быть описана следующим выражением (1):

$$q = 0,5 \cdot \rho_v \cdot v^2 \cdot k_1 \cdot C_p, \quad (1)$$

где:  $\rho_v = 1,225 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха в нормальных условиях;

$v$  — скорость движения поезда;

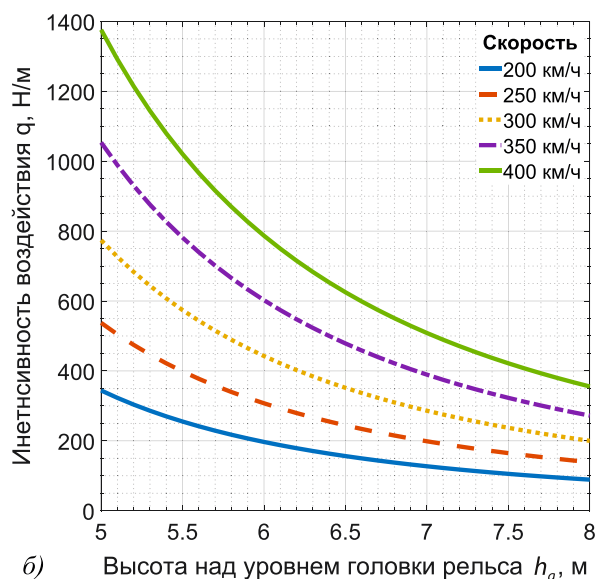
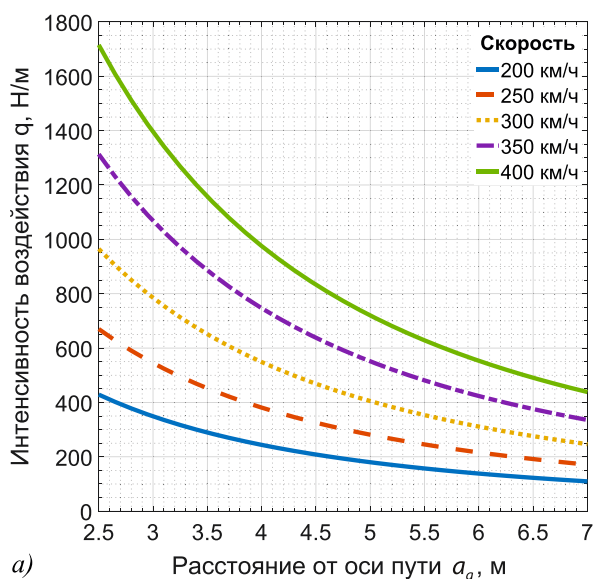
$k_1$  — коэффициент, учитывающий форму поезда;

$C_p$  — коэффициент распределения давления.

Коэффициент распределения давления зависит от рассматриваемого расчетного случая. При воздействии на вертикальные поверхности, параллельные оси пути, коэффициент  $C_p$  определяется в зависимости от расстояния от оси пути до поверхности  $a_g$  (рис. 8), согласно выражению (2):

$$C_p = C_{p1}(a_g) = \frac{8}{(a_g + 2,1)^2}. \quad (2)$$

При воздействии на горизонтальные поверхности, расположенные над подвижным составом, коэффициент  $C_p$  зависит от возвышения отметки низа конструкции над уровнем головки рельса  $h_g$  и ширины конструкции  $W$ . Так, при ширине конструкции от 1,5 до 3,0 м коэффициент  $C_p$  может определяться



**Рис. 6.** Графики распределения интенсивностей аэродинамического воздействия для:  
 а — вертикальной поверхности, расположенной параллельно оси пути;  
 б — горизонтальной поверхности, расположенной над подвижным составом

выражением (3), а при ширине конструкции от 3,0 до 20,0 м — выражением (4).

$$C_p = C_{p2}(h_g, W) = (0,04 \cdot W + 0,41) \cdot \frac{5,5}{(h_g - 1,9)^2}; \quad (3)$$

$$C_p = C_{p2}(h_g, W) = 0,53 \cdot \frac{5,5}{(h_g - 1,9)^2}. \quad (4)$$

При расчете конструкций, пересекающих ВСМ, ширина ( $W$ ) которых более 20 м, их требуется рассматривать как тоннели. В этом случае необходимо учитывать волновой характер воздействия аэродинамического давления на конструкцию.

Поперечное распределение нагрузки от аэродинамического воздействия на поверхность определяется выражениями (5), (6):

$$C_{p2}(h_g, W, a_g) = C_{p2}(h_g, W, 0) \cdot (1 - 0,01a_g^2), \quad (5)$$

если  $a_g < 10,0$  м;

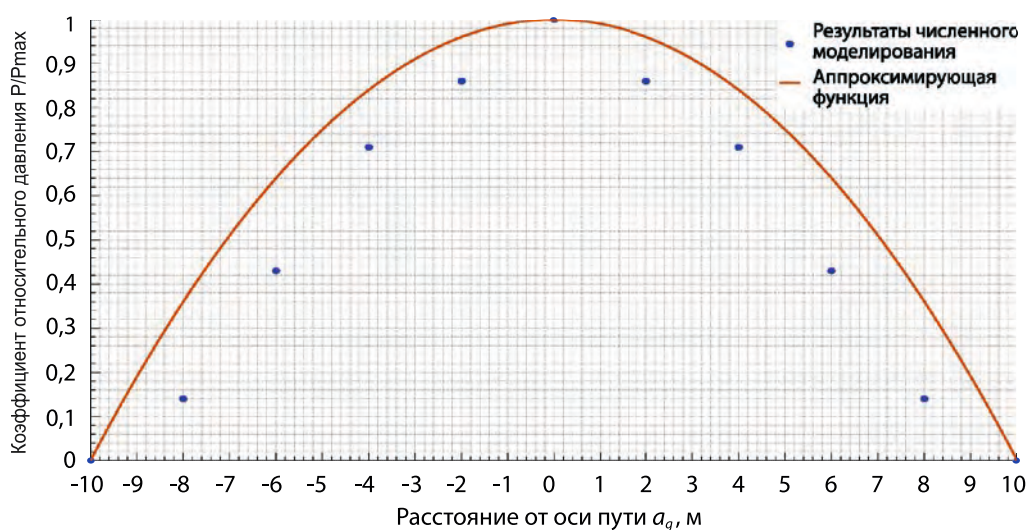
$$C_{p2}(h_g, W, a_g) = 0, \text{ если } a_g \geq 10,0 \text{ м.} \quad (6)$$

где  $a_g$  — расстояние от оси пути.

Сопоставление поперечного распределения нагрузки от аэродинамического воздействия, полученного по выражениям (5), (6), и распределения, полученного путем прямого численного моделирования, проиллюстрировано на рис. 7.

Коэффициент  $k_1$ , учитывающий аэродинамические качества подвижного состава, принимается равным 0,6 для высокоскоростных поездов с обтекаемыми формами (электропоезд типа «Сапсан» (рис. 8, а), 0,85 для скоростных поездов, не имеющих достаточно обтекаемых аэродинамических форм (электропоезд «Ласточка», электровозы ЧС6, ЧС200 и др. (рис. 8, б), и 1,0 для обычных поездов (электровозы ЭП2к и др. (рис. 8, в). Значения коэффициента аэродинамической формы были определены при проведении экспериментальных измерений аэродинамического воздействия подвижного состава [13].

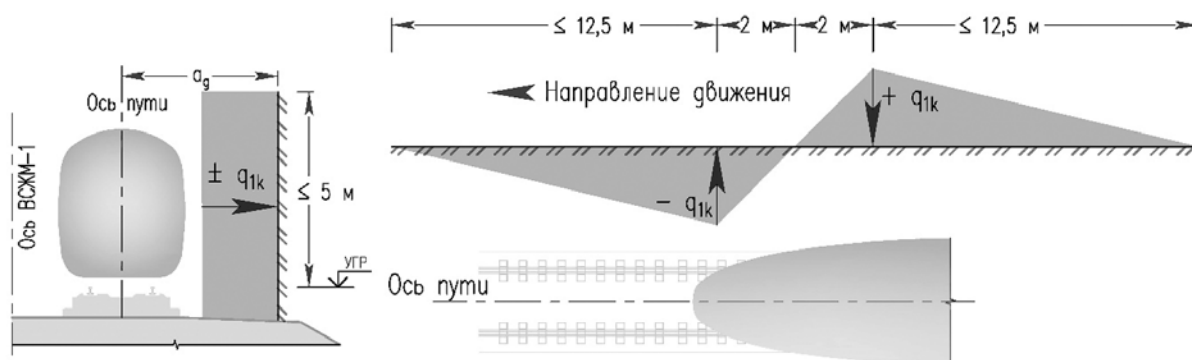
Предлагаемые схемы приложения эквивалентных нагрузок от аэродинамического воздействия представлены на рис. 9–10. Величины интенсивностей нагрузок  $q_{1k}$  и  $q_{2k}$



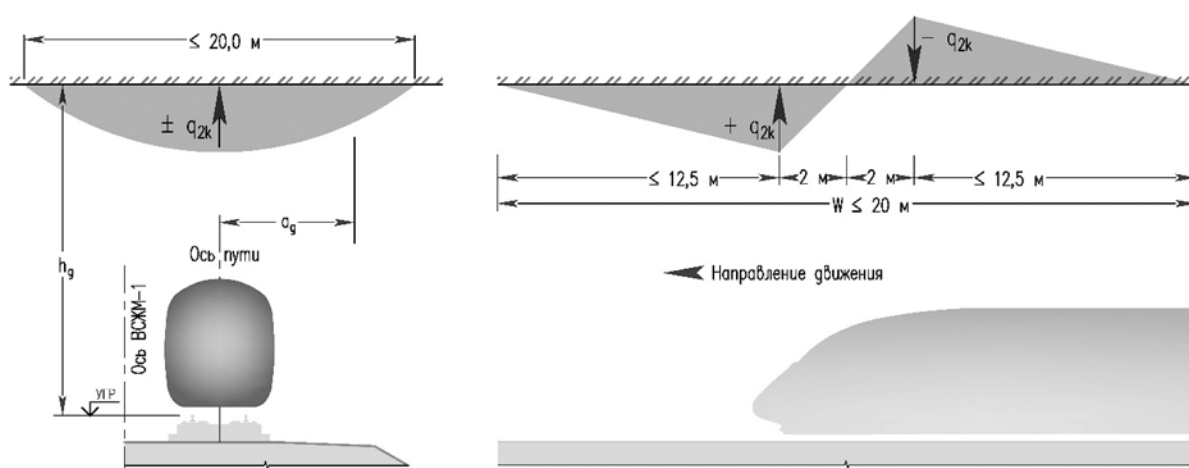
**Рис. 7.** Поперечное распределение нагрузки от аэродинамического воздействия на горизонтальную поверхность над осью пути



**Рис. 8.** Подвижной состав с наиболее характерными очертаниями кузовов.  
Фотографии предоставлены авторами



**Рис. 9.** Схема приложения эквивалентных нагрузок от аэродинамического воздействия на вертикальную поверхность, расположенную параллельно оси пути



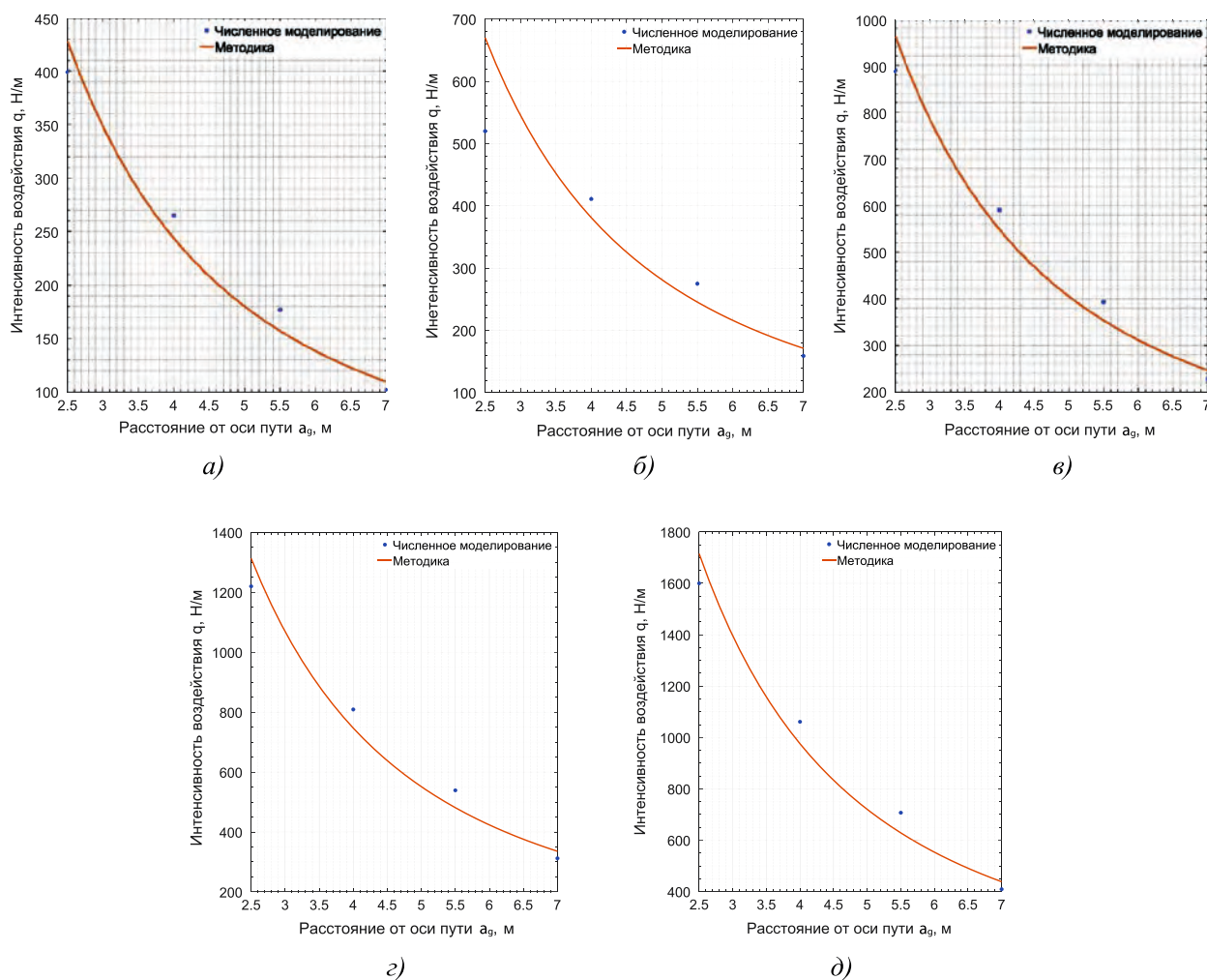
**Рис. 10.** Схема приложения эквивалентных нагрузок от аэродинамического воздействия на горизонтальную поверхность, расположенную над путем

приведены на рис. 6, а, для вертикальной поверхности, расположенной параллельно оси пути, и рис. 6, б, для горизонтальных поверхностей, расположенных над подвижным составом.

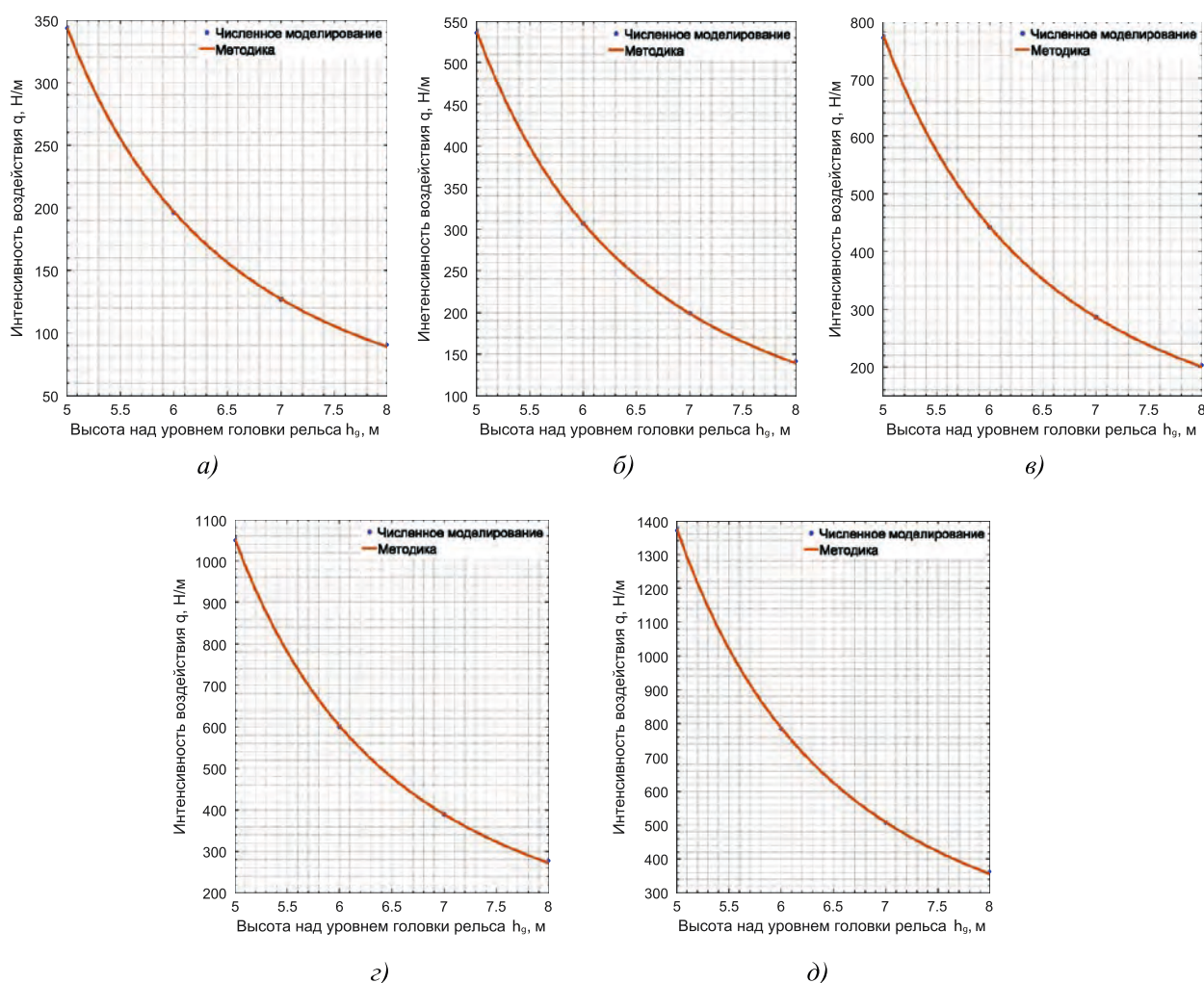
Оценка достоверности результатов представленной методики выполнена путем сопоставления с результатами, полученными путем прямого моделирования численного эксперимента в программном комплексе. Графики сопоставления величин интенсив-

ностей эквивалентных аэродинамических нагрузок, полученных методом прямого расчета и согласно методике, приведены на рис. 11, 12.

Сопоставление результатов численного моделирования в программном комплексе и предлагаемой методики демонстрирует их высокую степень сходимости, что подтверждает возможность ее практического применения при проектировании объектов инфраструктуры ВСЖМ.



**Рис. 11.** Графики сопоставления величины аэродинамического воздействия на вертикальную поверхность, расположенную вдоль оси пути, полученные численным моделированием в программном комплексе и по предлагаемой методике при скоростях движения: а — 200 км/ч, б — 250 км/ч, в — 300 км/ч, г — 350 км/ч, д — 400 км/ч



**Рис. 12.** Графики сопоставления величины аэродинамического воздействия на горизонтальную поверхность над путем, полученные с помощью численного моделирования в программном комплексе и по предлагаемой методике при скоростях движения:  
*a* — 200 км/ч, *б* — 250 км/ч, *в* — 300 км/ч, *г* — 350 км/ч, *д* — 400 км/ч

### Заключение

В настоящей статье были рассмотрены вопросы актуализации и совершенствования методики учета аэродинамического воздействия от высокоскоростных поездов на объекты инфраструктуры.

На основании результатов анализа существующих отечественных разработок и исследований в части аэродинамического воздействия подвижного состава и инфраструктуры был сделан вывод о его недостаточной из-

ученности. В качестве метода исследования было выбрано численное моделирование в программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX. Также для комплексного исследования аэродинамического воздействия и верификации расчетных моделей были выполнены экспериментальные измерения аэродинамического воздействия высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на линии Санкт-Петербург — Москва при скоростях движения до 250 км/ч.

В дальнейшем путем прямого численного моделирования были определены распределения нагрузок от аэродинамического воздействия для двух наиболее характерных расчетных случаев: воздействие на вертикальные конструкции, расположенные параллельно оси пути, и воздействие на горизонтальные конструкции, расположенные над поездом. Сопоставление полученных результатов интенсивностей нагрузок и их распределения с аналогичными результатами, полученными по действующим методикам, демонстрирует необходимость корректировки существующей методики.

В заключение были представлены результаты корректировки схем приложения нагрузок от аэродинамического воздействия и их интенсивностей.

### Библиографический список

1. Смирнов В. Н., Дьяченко Л. К., Дьяченко А. О. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // БРНИ. 2017. № 3. С. 69–81.
2. Бенин А. В., Дьяченко Л. К., Смирнов В. Н. Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. № 4 (45). С. 15–20.
3. Дьяченко Л. К., Воробьев Д. Е., Барановский А. А. Особенности аэродинамического воздействия высокоскоростных поездов на объекты инфраструктуры // Новые технологии в мостостроении: сб. трудов Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 28 апреля 2017 года. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018. С. 66–75.
4. Лазаренко Ю. М., Капускин А. Н. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 4. С. 11–14.
5. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 1. Fundamentals // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1201. P. 201–228.
6. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 2. Application // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1202. P. 345–382.
7. Проектирование защитных сооружений приближенных строений железнодорожной инфраструктуры на основе методики оценки аэродинамического влияния высокоскоростного подвижного состава / Ватулина Е. Я., Комиссаров Е. В., Поляков Б. О. и др. // Вестник научных конференций. 2016. № 4–2. С. 26–34.
8. Указания по проектированию мостов для головного участка Ленинград — Москва высокоскоростной пассажирской магистрали «Центр — Юг». Л., 1990. 29 с.
9. Богданов Г. И., Смирнов В. Н. Из истории разработки проекта специальных технических условий для проектирования мостов на ВСМ-2 Москва — Казань // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему): сб. трудов Международной научно-технической конференции 2015 года, Санкт-Петербург, 21–22 апреля 2015 года. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. С. 57–67.
10. Специальные технические условия «Сооружения искусственного участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань — Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству». СПб., 2016.
11. Методика расчета аэродинамического воздействия от высокоскоростных поездов при скоростях движения 400 км/ч и ветра на конструкции пролетных строений мостовых сооружений, а также на конструкции объектов инфраструктуры, расположенных в непосредственной близости от желез-



нодорожного пути (для опытного применения на высокоскоростных железнодорожных магистралях). М., 2016.

12. Комплексные измерения динамического и аэродинамического воздействий высокоскоростного подвижного состава на мостовые сооружения / Лабутин Н. А., Ланг А. В., Луковников Е. Е. и др. // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в двух томах, Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2022 года. Т. 1. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. С. 34–38.

13. Лабутин Н. А., Дьяченко Л. К., Ланг А. В. Экспериментальные измерения аэродинамики подвижного состава // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (62). С. 40–48.

14. Айрапетов А. Б., Катунин А. В. Исследование картины аэродинамического взаимодействия скоростного поезда, движущегося под конструкцией автомобильного путепровода на установке прямого движения // Материалы XXVII научно-технической конференции по аэродинамике, Жуковский, Московская область, 21–22 апреля 2016 года / Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ). Жуковский: Централь-

ный аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ). 2016. С. 23–24.

15. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Афанасьева И. Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства: учеб. пособие. М.: АСВ, 2017. 720 с.

16. Лабутин Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 4 (101). С. 6–16.

17. Labutin N. A., Benin A. V., Diachenko L. K. Experimental verification of a simulation model of high-speed train aerodynamic impact on railway infrastructure. Civil Engineering Conference (CEC 2022) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022. No. 1252. С. 1–8.

Дата поступления: 15.11.2023

Решение о публикации: 15.01.2024

#### **Контактная информация:**

ЛАБУТИН Никита Андреевич — аспирант, инженер; labutin@pgups.ru

ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович — канд. техн. наук, генеральный директор;

lkdiachenko@ebs-spb.tech

ЛУКОВНИКОВ Егор Евгеньевич — аспирант; lee0202@vk.com

## Updating the methodology for considering the aerodynamic impact from trains on high-speed railways

N. A. Labutin<sup>1</sup>, L. K. Diachenko<sup>2</sup>, E. E. Lukovnikov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>1,2</sup> “Engineering bureau of structures” LLC, 113a, nab. reki Fontanki, Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Labutin N. A., D'yachenko L. K., Lukovnikov E. E. Updating the methodology for considering the aerodynamic impact from trains on high-speed railways. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 142–155. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-142-155. (In Russian)

### Abstract

In the calculation of structures located near railway tracks (noise protection screens along the tracks, overpasses over high-speed railway lines (HSM) of deck elements with downhill driving, etc.), the aerodynamic effects of high-speed trains shall be considered. **Objective:** study of the aerodynamic impact of a moving high-speed train on structures and structures, Located in the immediate vicinity of the high-speed railway line with subsequent adjustment of the current regulatory framework for the design of TSM infrastructure facilities. **Methods:** mathematical modeling in a specialized software complex of computational hydrogas dynamics with experimental verification of the developed calculation models and subsequent analysis and generalization of the obtained results. **Results:** distribution patterns and aerodynamic intensities from a moving high-speed train for the two most characteristic design cases: impact on a vertical surface parallel to the track axis and on a horizontal surface, located above the axis of train movement. For the calculation cases under consideration, the intensity of the impact was related to parameters such as the distance to the structure from the path axis (for the vertical surface) and the height above the rail head (for the horizontal surface). **Practical importance:** the need Development of proposals for adjustment and addition of the current regulatory framework for the design of structures and structures included in the infrastructure of high-speed railway lines.

**Keywords:** high-speed railway, high-speed line, aerodynamics, aerodynamic impact, high-speed train, infrastructure, infrastructure facilities.

### References

1. Smirnov V. N., D'yachenko L. K., D'yachenko A. O. Osobennosti proektirovaniya mostov na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah // BRNI. 2017. No. 3. S. 69–81. (In Russian)
2. Benin A. V., D'yachenko L. K., Smirnov V. N. Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva mostov vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva — Kazan' // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2015. No. 4 (45). S. 15–20. (In Russian)
3. D'yachenko L. K., Vorob'ev D. E., Baranovskij A. A. Osobennosti aerodinamicheskogo vozdeystviya vysokoskorostnyh poezdov na ob'ekty infrastruktury // Novye tekhnologii v mostostroenii: sb. trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 28 aprelya 2017 goda. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2018. S. 66–75. (In Russian)
4. Lazarenko Yu. M., Kapuskin A. N. Aerodinamicheskoe vozdeystvie vysokoskorostnogo elektropoezda “Sapsan” na passazhirov na platformah i na vstrechnye poezda pri skreshchenii // Vestnik VNIIZHT. 2012. No. 4. S. 11–14. (In Russian)
5. Baker S. J. A review of train aerodynamics. Part 1. Fundamentals // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1201. P. 201–228.
6. Baker C. J. A review of train aerodynamics. Part 2. Application // The Aeronautical Journal. 2014. Vol. 118, iss. 1202. P. 345–382.

7. Proektirovanie zashchitnyh sooruzhenij priblizhennyh stroenij zheleznodorozhnoj infrastruktury na osnove metodiki ocenki aerodinamicheskogo vliyaniya vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava / E. Ya. Vatulina, E. V. Komissarov, B. O. Polyakov i dr. // Vestnik nauchnyh konferencij. 2016. No. 4–2. S. 26–34. (In Russian)

8. Ukazaniya po proektirovaniyu mostov dlya golovnogo uchastka Leningrad — Moskva vysokoskorostnoj passazhirskoj magistrali “Centr — Yug”. L., 1990. 29 s. (In Russian)

9. Bogdanov G. I., Smirnov V. N. Iz istorii razrabotki proekta special’nyh tekhnicheskikh uslovij dlya proektirovaniya mostov na VSM-2 Moskva — Kazan’ // Novye tekhnologii v mostostroenii (ot proshlogo k budushchemu): sb. trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii 2015 goda, Sankt-Peterburg, 21–22 aprelya 2015 goda. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2015. S. 57–67. (In Russian)

10. Special’nye tekhnicheskie usloviya “Sooruzheniya iskusstvennogo uchastka Moskva — Kazan’ vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva — Kazan’ — Ekaterinburg. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel’stvu”. SPb., 2016. (In Russian)

11. Metodika rascheta aerodinamicheskogo vozdejstviya ot vysokoskorostnyh poezdov pri skorostyah dvizheniya 400 km/ch i vetra na konstrukcii proletnyh stroenij mostovyh sooruzhenij, a takzhe na konstrukcii ob’ektov infrastruktury, raspolozhennyh v neposredstvennoj blizosti ot zheleznodorozhnogo puti (dlya opytnogo primeneniya na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah). M., 2016. (In Russian)

12. Kompleksnye izmereniya dinamicheskogo i aerodinamicheskogo vozdejstvij vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava na mostovye sooruzheniya / Labutin N. A., Lang A. V., Lukovnikov E. E. i dr. // Transport: problemy, idei, perspektivy: sb. trudov LXXXII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh, v dvuh tomah, Sankt-Peterburg, 18–25 aprelya 2022 goda. T. 1. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej

soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2022. S. 34–38. (In Russian)

13. Labutin N. A., D’yachenko L. K., Lang A. V. Eksperimental’nye izmereniya aerodinamiki podvizhnogo sostava // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. No. 3 (62). S. 40–48. (In Russian)

14. Ajrapetov A. B., Katunin A. V. Issledovanie kartiny aerodinamicheskogo vzaimodejstviya skorostnogo poezda, dvizhushchegosya pod konstrukciej avtomobil’nogo puteprovoda na ustanovke pryamogo dvizheniya // Materialy XXVII nauchno-tekhnicheskoy konferencii po aerodinamike, Zhukovskij, Moskovskaya oblast’, 21–22 aprelya 2016 goda / Central’nyj aerogidrodinamicheskij institut imeni prof. N. E. Zhukovskogo (CAGI). Zhukovskij: Central’nyj aerogidrodinamicheskij institut imeni prof. N. E. Zhukovskogo (CAGI). 2016. S. 23–24. (In Russian)

15. Belostockij A. M., Akimov P. A., Afanas’eva I. N. Vychislitel’naya aerodinamika v zadachah stroitel’stva : ucheb. posobie. M.: ASV, 2017. 720 s. (In Russian)

16. Labutin N. A. Razrabotka chislennoj modeli aerodinamicheskogo vzaimodejstviya vysokoskorostnogo poezda, vozduшной sredy i ob’ektov infrastruktury // Mir transporta. 2022. T. 20, no. 4 (101). S. 6–16. (In Russian)

17. Labutin N. A., Benin A. V., Diachenko L. K. Experimental verification of a simulation model of high-speed train aerodynamic impact on railway infrastructure. Civil Engineering Conference (CEC 2022) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2022. No. 1252. P. 1–8.

Received: 15.11.2023

Accepted: 15.01.2024

#### Author’s information:

Nikita A. LABUTIN — Postgraduate Student, engineer; labutin@pgups.ru

Leonid K. DIACHENKO — PhD in Engineering, Chief Executive Officer “Engineering bureau of structures” LLC.; lkdiachenko@ebs-spb.tech

Egor E. LUKOVNIKOV — Postgraduate Student; lee0202@vk.com

УДК 629.4.072.2

## Сравнение длины тормозных путей грузового поезда с однострубным и двухтрубным питанием тормозной системы

Д. В. Осипов, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, К. Е. Пронин

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

**Для цитирования:** Осипов Д. В., Иванов П. Ю., Хамнаева А. А., Пронин К. Е. Сравнение длины тормозных путей грузового поезда с однострубным и двухтрубным питанием тормозной системы // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 156–168. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-156-168

### Аннотация

**Цель:** выполнить сравнительный анализ длины тормозного пути грузового поезда с однострубным и двухтрубным питанием тормозной системы. На основании проведенных лабораторных исследований выявить влияние скорости и величины наполнения тормозных цилиндров на расчетный тормозной путь грузового подвижного состава при применении тормозных систем с двухтрубным и однострубным питанием запасного резервуара. Данные исследования направлены на повышение технической скорости и безопасности движения грузовых поездов, а также на повышение эффективности работы тормозной системы при циклических торможениях с целью снижения ее истощимости. **Методы:** анализ скорости наполнения тормозных цилиндров с целью определения времени подготовки тормозов к действию в зависимости от способа организации питания тормозной системы; сравнение длины подготовительного и действительного тормозного пути по методу интервалов скорости, предложенному в правилах тяговых расчетов. Также было принято, что состав осуществлял торможение до полной остановки на прямом горизонтальном участке пути, с наличием утечек воздуха из тормозных цилиндров по всему составу. **Результаты:** выявлено, что двухтрубная тормозная система позволяет развивать значительно больший тормозной эффект, чем однострубная тормозная система при аналогичном техническом состоянии пневматической системы поезда. Как следствие, при новом способе организации питания запасного резервуара наблюдается значительное сокращение времени подготовки тормозов к действию, а также сокращение длины полного тормозного пути. **Практическая значимость:** доказано, что применение новой тормозной системы позволит повысить эффективность работы тормозной системы, что приводит к сокращению тормозного пути. Это, в свою очередь, позволит повысить безопасность и скорость движения поездов по участкам, а также повысит среднюю массу поездов.

**Ключевые слова:** действительный тормозной путь, подготовительный тормозной путь, однострубная тормозная система, двухтрубная тормозная система, метод интервалов скорости, действительное нажатие на тормозную колодку, чугунная тормозная колодка, композиционная тормозная колодка.

### Введение

На сегодняшний день предприятиям железнодорожного транспорта по требованиям решения правительства необходимо к 2025 году увеличить погрузки на 40 %, а также в 4 раза увеличить объем контейнер-

ных транзитных перевозок [1]. Возможными направлениями решения данной задачи могут являться:

- повышение массы и длины грузовых поездов;

- уменьшение интервалов между поездами попутного следования;
- повышение скорости следования.

Как известно, средний вес грузового поезда с 1991 по 2023 год вырос более чем на 30 %. При этом на отдельных направлениях масса поезда может достигать 9 тыс. тонн, а соединенных поездов — до 14,2 тыс. тонн. Отсюда возникает недостаточный эффект от работы тормозных средств поезда. Решение этой задачи является важным направлением развития железнодорожного транспорта [2]. При этом данные мероприятия приводят к снижению участковой и технической скоростей движения, а также безопасности перевозочного процесса. Это происходит за счет увеличения длины тормозного пути составов с повышенной массой, а также увеличения времени протекания пневматических процессов при зарядке и отпуске в связи с увеличением объемов тормозной системы [3]. Также в связи с ростом энергопотребления для обеспечения тяги поездов понижается и энергообеспеченность полигонов, особенно актуальна данная проблема для Восточного полигона [4].

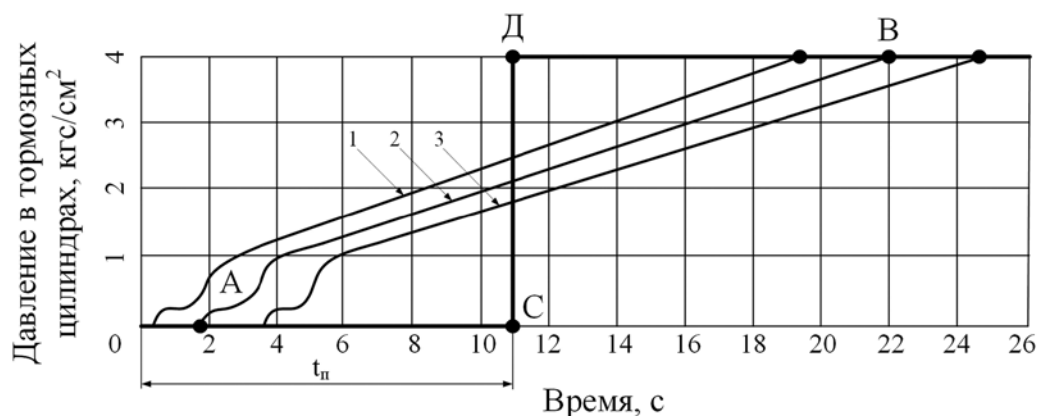
Совершенствование тормозных приборов и устройств — основное направление в развитии тормозных систем. За счет их модернизации можно добиться увеличения скорости распространения тормозной волны, повышения эффективности торможения и снижения фрикционных элементов (тормозных колодок и накладок) за счет использования инновационных композитных материалов. В последнее время все чаще используются вихретоковые тормоза [3, 5–6]. Однако для повышения безопасности движения поездов целесообразнее сохранить фрикционный тормоз. А решение вышеуказанных проблем возможно за счет модернизации суще-

ствующей однотрубной тормозной системы путем обеспечения двухтрубного питания. Данное решение позволит снизить расход электроэнергии на тягу [7]. Также по результатам ранее проведенного математического компьютерного моделирования и испытаний на стенде [8, 9] доказано, что тормозная система с двухтрубным питанием позволяет значительно сократить подготовительный тормозной путь за счет повышения эффективности работы пневматического тормоза. Далее необходимо провести сравнительный расчет тормозного пути поезда в зависимости от способа организации питания тормозной системы на основе полученных ранее экспериментальных данных по скорости и величине достигнутого давления сжатого воздуха в тормозном цилиндре для однотрубной и двухтрубной тормозных систем.

#### **Расчет длины тормозного пути подвижного состава, оборудованного однотрубной и двухтрубной тормозными системами**

Как известно из правил тяговых расчетов (далее — ПТР) [10], полный тормозной путь поезда состоит из действительного и подготовительного тормозных путей. На сегодняшний день для упрощенного расчета подготовительного тормозного пути принято считать, что с момента перевода органа управления крана машиниста в одно из тормозных положений проходит определенный период времени, который называется временем подготовки тормозов к действию, после чего тормозная сила достигает максимального значения (рис. 1) [11].

На основании принятой методики графически определим время подготовки тормозов к действию по диаграммам зависимости процесса нарастания давления в тормозном



АВ — действительная кривая наполнения тормозного цилиндра;

СД — условный процесс подготовки тормозов к действию

**Рис. 1.** Диаграмма наполнения тормозных цилиндров в грузовом поезде в зависимости от времени: 1 — головной вагон; 2 — средний вагон; 3 — хвостовой вагон

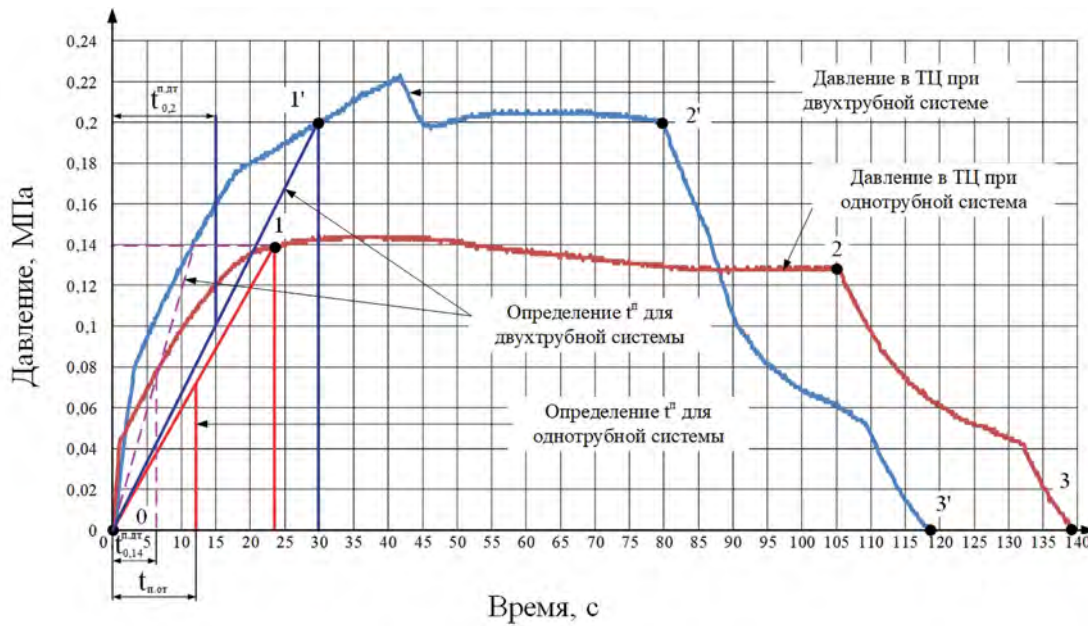
цилиндре для однотрубной и двухтрубной тормозных систем, полученных экспериментальным путем (рис. 2). Исследования проводились на лабораторном стенде, состоящем из тормозного оборудования локомотива и двух вагонов. Давление в тормозном цилиндре приведено для первого вагона. Методика проведения эксперимента и результаты исследований приведены в работе [9]. Расчеты для действительного тормозного пути будем проводить для грузового груженого поезда, состоящего из 78 четырехосных полувагонов со средней массой каждого вагона 91 тонна, при наличии потележечного торможения и авторегулятора тормозной рычажной передачи (ТРП). Поезд движется по прямому горизонтальному участку пути и осуществляет полное служебное торможение с начальной скоростью 90 км/ч. В качестве расчетного локомотива примем электровоз серии ЗЭС5К. Для проведения сравнительного анализа длины тормозного пути поезда в зависимости от способа организации питания тормозной системы воспользуемся методом интервалов скорости, согласно ПТР [10]. Так как расчет произво-

дится для горизонтального участка пути, то тормозное нажатие на колодки локомотива в расчет не принимаем [12].

По графику зависимости давления в тормозном цилиндре от времени видно, что процесс подготовки тормозов к действию для однотрубной тормозной системы занял 12 секунд. В том случае, если для двухтрубной тормозной системы рассматривать время заполнения тормозного цилиндра до давления 0,14 МПа, то время подготовки тормозов к действию  $t_{0,14}^{п.дт} = 6$  секунд, что в 2 раза быстрее, чем для системы с однотрубным питанием. Если при двухтрубной системе заполнять тормозной цилиндр до давления 0,2 МПа, то время подготовки тормозов к действию  $t_{0,2}^{п.дт} = 15$  секунд. Тормозной путь, пройденный поездом до момента получения первого тормозного эффекта, определим по выражению:

$$S_{п} = 0,278v_0t_{п}, \quad (1)$$

где  $v_0$  — начальная скорость поезда, с которой осуществляется торможение, 90 км/ч;



0–1, 0–1’ — торможение; 1–2, 1’–2’ — перекрыша с питанием; 2–3, 2’–3’ — отпуск для однотрубной и двухтрубной тормозной системы соответственно;  $t_{п.от, дт}$  — время подготовки тормозов к действию для однотрубной и двухтрубной тормозной системы соответственно

**Рис. 2.** Определение времени подготовки тормозов к действию

$t_{п}$  — время подготовки тормозов к действию.

В результате проведенных расчетов длина подготовительного тормозного пути для однотрубной тормозной системы  $S_{п} = 300,24$  м, для двухтрубной при величине заполнения тормозного цилиндра до 0,14 МПа  $S_{0,14}^{п} = 150,12$  м, а для давления 0,2 МПа  $S_{0,2}^{п} = 375,3$  м.

Действительный тормозной путь определяется по выражению:

$$S_{д} = \sum \frac{500(v_{н}^2 - v_{к}^2)}{\zeta(1000\mathcal{G}_p\phi_{кр} + w_{ок} + w_c)}, \quad (2)$$

где  $v_{н}$  — скорость движения поезда в начальный период времени для расчетного интервала, км/ч;

$v_{к}$  — конечная скорость в расчетном интервале, км/ч;

$\zeta$  — коэффициент, учитывающий замедление поезда под действием удельной замедляющей силы, км/ч<sup>2</sup>;

$\phi_{кр}$  — расчетный коэффициент трения в системе «колодка–колесо»;

$w_{ок}$  — основное удельное сопротивление движению поезда в режиме выбега локомотива, Н/т;

$w_c$  — удельное сопротивление от спрямленного уклона, Н/т;

$\mathcal{G}_p$  — расчетный тормозной коэффициент поезда.

$$\mathcal{G}_p = \frac{\sum K_p}{(Q + P_y)}, \quad (3)$$

где  $Q$  — масса состава, т;

$P_y$  — учетная масса локомотива;

$K_p$  — расчетная сила прижатия тормозной колодки к колесу.

– для чугунных колодок:

$$K_p = 2,22K \frac{1,6K + 100}{8,0K + 100}. \quad (4)$$

– для композиционных колодок:

$$K_p = 1,22K \frac{0,1K + 20}{0,4K + 20}. \quad (5)$$

где  $K$  — действительная сила прижатия тормозной колодки к колесу, кН.

Расчетный коэффициент трения:

– для чугунных колодок:

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100}. \quad (6)$$

– для колодок, изготовленных из композиционных материалов:

$$\varphi_{кр} = 0,36 \frac{v + 150}{2v + 150}. \quad (7)$$

где  $v$  — скорость движения поезда.

Основное удельное сопротивление движению состава в режиме выбега локомотива для четырехосных полувагонов с буксовыми узлами на роликовых подшипниках:

$$w_{ок} = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785v + 0,027v^2}{q_0}, \quad (8)$$

где  $q_0$  — осевая нагрузка вагона, т.

Удельное сопротивление от спрямленного уклона:

$$w_c = 9,8i_c, \quad (9)$$

где  $i_c$  — величина уклона,‰.

По данным выражениям был рассчитан действительный тормозной путь поезда и построены графики зависимости полного тормозного пути от времени для составов, обо-

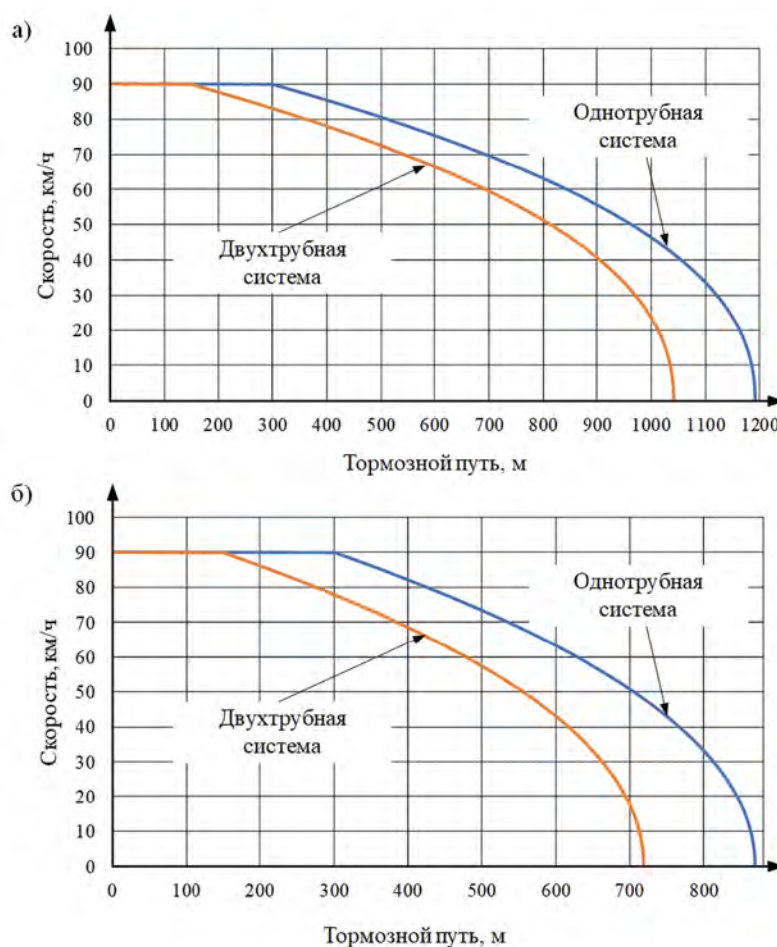
рудованных композиционными и чугунными колодками для однострубногo и двухтрубногo способа организации питания тормозной системы (рис. 3, а, б) при осевом нажатии тормозной колодки с силой 70 кН.

При проведении экспериментального исследования и сравнения эффективности работы однострубногo и двухтрубногo тормозной системы ступень разрядки тормозной магистрали для двух типов тормозных систем не менялась. Однако, как мы можем видеть по рис. 2, величина заполнения тормозного цилиндра для двухтрубногo тормозной системы больше, чем для однострубногo. Следовательно, необходимо провести сравнительный расчет длины действительного тормозного пути, при новой величине силы прижатия колодок к колесу в зависимости от установившегося уровня давления сжатого воздуха в тормозном цилиндре [13–15].

Стоит отметить, что режим загрузки воздухораспределителя установлен на средний режим, следовательно, давление в ТЦ при полном служебном торможении должно быть 0,3 МПа. По графику (рис. 2) видно, что вследствие утечек из тормозного цилиндра для тормозной системы с однострубным питанием давление в нем не достигло целевого значения, находясь при этом ниже уровня заполнения для порожнего режима загрузки (0,2 МПа). Двухтрубная тормозная система позволила сохранить минимально необходимое значение величины давления в ТЦ для осуществления торможения. Также наблюдается снижение величины установившегося давления ТЦ в режиме перекрыши для однострубногo тормозной системы вследствие утечек.

Определим действительную силу нажатия на колодку для однострубногo и двухтрубногo тормозных систем по выражению [15]:





**Рис. 3.** График зависимости полного тормозного пути от скорости движения для однотрубной и двухтрубной тормозной системы для состава:  
 а) оборудованного чугунными колодками; б) оборудованного композиционными колодками

$$K = \frac{1}{m} \left( \frac{\pi d_{\text{ц}}^2}{4} p_{\text{ц}} \eta_{\text{ц}} - F_1 - F_2 \right) n \eta_{\text{п}}. \quad (10)$$

где  $m$  — количество тормозных колодок, воздействующих на ось, 2;

$d_{\text{ц}}^2$  — диаметр поршня тормозного цилиндра, 0,254 м;

$p_{\text{ц}}$  — расчетная величина давления воздуха в тормозном цилиндре: при однотрубном способе питания тормозной системы — 130 кПа, а при двухтрубном — 200 кПа;

$\eta_{\text{ц}}$  — коэффициент полезного действия тормозного цилиндра, 0,98;

$F_1$  — сила, с которой действует на сжатие внутренняя отпускная пружина тормозного цилиндра, кН;

$F_2$  — сила, с которой действует на сжатие пружина авторегулятора рычажной передачи, приведенная к штоку тормозного цилиндра, кН;

$n$  — передаточное число рычажной передачи;

$\eta_{\text{п}}$  — коэффициент полезного действия тормозной рычажной передачи, 0,95.

Усилие отпускной пружины тормозного цилиндра:

$$F_1 = P_0 + Ж_{ц} l_{шт},$$

$$F_1 = 0,8 + 2,3 \cdot 0,075 = 0,97 \text{ кН.} \quad (11)$$

где  $P_0$  — усилие предварительного сжатия пружины тормозного цилиндра, 0,8 кН;  
 $Ж_{ц}$  — жесткость отпусной пружины тормозного цилиндра, 2,3 кН/м;  
 $l_{шт}$  — величина расчетной длины выхода штока тормозного цилиндра, 0,075 м.

Усилие пружины авторегулятора:

$$F_2 = (P_p + Ж_p l_p) n_p. \quad (12)$$

где  $P_p$  — сила предварительного сжатия пружины авторегулятора, 1,68 кН;  
 $Ж_p$  — жесткость пружины авторегулятора тормозной рычажной передачи, 2,35 кН/м;  
 $l_p$  — величина сжатия пружины авторегулятора при торможении, 0,015 м;  
 $n_p$  — передаточное число привода авторегулятора.

Для расчета коэффициента передачи привода авторегулятора ТРП примем, что для четырехосного вагона с потележечным торможением и односторонним нажатием колодки на колесо используется авторегулятор рычажного типа (рис. 4).

Передаточный коэффициент тормозной рычажной передачи зависит от соотношения длин ведущих плеч к длинам ведомых плеч, коэффициента полезного действия и количества колодок, на которые передается усилие от тормозного цилиндра [14]:

$$n = \left( \frac{l_a \cdot l_d + l_c}{l_b \cdot l_d} \right) + \left( \frac{l_a \cdot l_c \cdot l_e + l_f}{l_b \cdot l_d \cdot l_f} \right) \cdot \cos(\alpha) \cdot m, \quad (13)$$

$$n = \left( \frac{0,145 \cdot 0,160 + 0,400}{0,355 \cdot 0,160} \right) \cdot \left( \frac{0,145 \cdot 0,4 \cdot 0,160 + 0,400}{0,355 \cdot 0,16 \cdot 0,160} \right) \cdot \cos(10^\circ) \cdot 2 = 3,94.$$

где  $l_a$  — длина плеча  $a$  тормозной рычажной передачи, 0,145 м;  
 $l_b$  — длина плеча  $b$  тормозной рычажной передачи, 0,355 м;  
 $l_c = l_f$  — длина плеча  $c$  тормозной рычажной передачи, 0,400 м;  
 $l_d = l_e$  — длина плеча  $d$  тормозной рычажной передачи, 0,160 м;  
 $m$  — количество пар тормозных колодок, воспринимающих усилие от одного тормозного цилиндра, 2;  
 $\cos(\alpha)$  — угол наклона тормозных колодок,  $10^\circ$ .

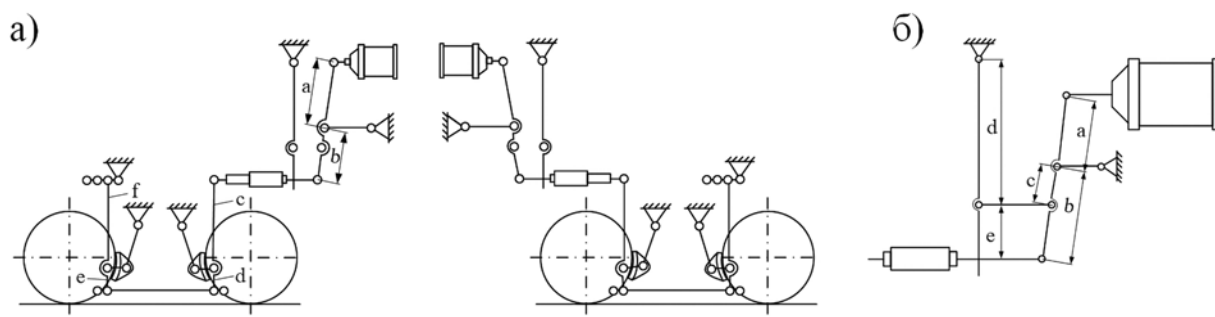


Рис. 4. Схема расчета передаточных отношений: а) тормозной рычажной передачи; б) привода авторегулятора тормозной рычажной передачи

В свою очередь, передаточное отношение авторегулятора зависит только от соотношения длин ведомых и ведущих плеч:

$$n_p = \frac{l_b}{l_a} - \frac{l_c}{l_a} \cdot \frac{l_d + l_e}{l_d}, \quad (14)$$

$$n_p = \frac{0,355}{0,145} - \frac{0,160}{0,145} \cdot \frac{0,500 + 0,200}{0,500} = 0,9.$$

где  $l_a$  — длина плеча  $a$  тормозной рычажной передачи, 0,145 м;

$l_b$  — длина плеча  $b$  тормозной рычажной передачи, 0,355 м;

$l_c$  — длина плеча  $c$  тормозной рычажной передачи, 0,160 м;

$l_d$  — длина плеча  $d$  тормозной рычажной передачи, 0,500 м;

$l_e$  — длина плеча  $e$  тормозной рычажной передачи, 0,200 м;

Усилие пружины авторегулятора по выражению (12) составит:

$$F_2 = (1,68 + 2,35 \cdot 0,015) \cdot 0,9 = 1,55 \text{ кН.}$$

Тогда нажатие на ось составит:

– для однотрубной системы:

$$K_{от} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,254^2}{4} \cdot 130 \cdot 0,98 - 0,97 - 1,55 \right) \cdot 3,94 \cdot 0,95 = 7,35 \text{ кН.}$$

– для двухтрубной системы:

$$K_{дт} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,254^2}{4} \cdot 200 \cdot 0,98 - 0,97 - 1,55 \right) \cdot 3,94 \cdot 0,95 = 27,72 \text{ кН.}$$

Полученные действительные силы нажатия колодок на колесо необходимо привести к расчетным посредством выражения (5):

– для однотрубной тормозной системы:

$$K_p^{от} = 1,22 \cdot 7,35 \cdot \frac{0,1 \cdot 7,35 + 20}{0,4 \cdot 7,35 + 20} = 8,11.$$

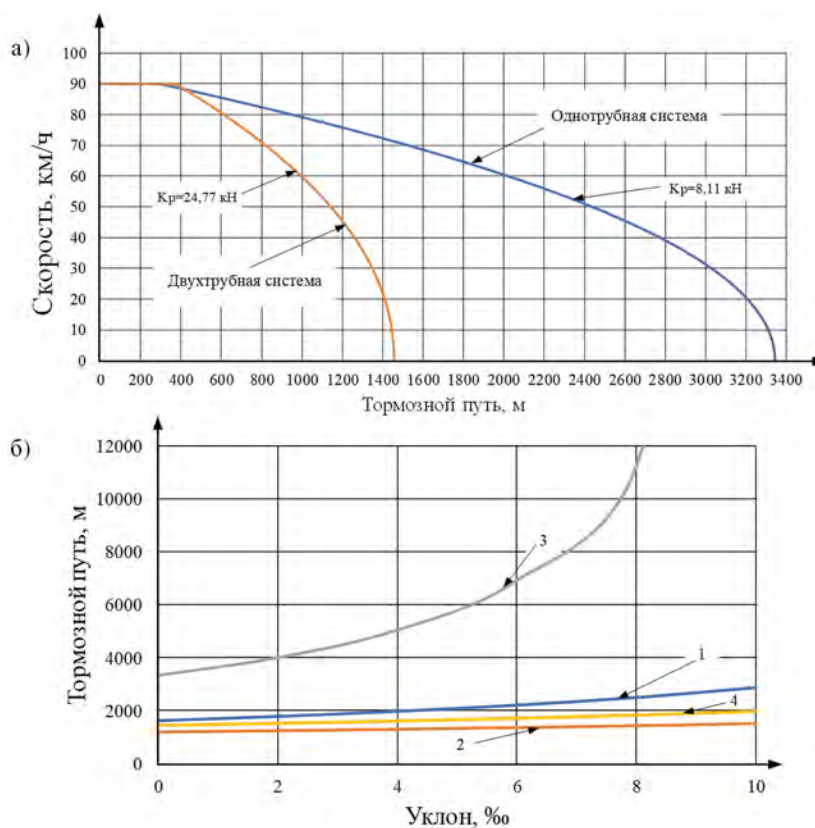
– для тормозной системы с двухтрубным питанием:

$$K_p^{од} = 1,22 \cdot 27,72 \cdot \frac{0,1 \cdot 27,72 + 20}{0,4 \cdot 27,72 + 20} = 24,77.$$

Далее по выражениям (2–9) был рассчитан действительный тормозной путь в зависимости от полученных значений нажатия колодок на ось, в результате расчета построены графики зависимости длины полного тормозного пути от скорости (рис. 5, а). При двухтрубной тормозной системе подготовительный тормозной путь несколько увеличился в связи с увеличением максимального давления в тормозном цилиндре. На рис. 5, б приведен график зависимости длины тормозного пути поезда для двух способов питания тормозной системы в зависимости от величины уклона согласно правилам технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава [16].

Как уже говорилось ранее, расчет длины тормозного пути осуществлялся при заведомо неисправной тормозной системе. Данная неисправность была вызвана неудовлетворительной плотностью тормозной системы в связи с наличием в тормозных цилиндрах значительных утечек сжатого воздуха. Следовательно, давление сжатого воздуха в тормозном цилиндре не достигало требуемого значения, а запасной резервуар в процессе торможения истощался.

Это вызвало снижение расчетной величины нажатия тормозной колодки более чем



- 1 — тормозной путь поезда, согласно правилам управления тормозами;
- 2 — тормозной путь поезда при однотрубной тормозной системе без утечек;
- 3 — тормозной путь поезда при однотрубной тормозной системе с утечками;
- 4 — тормозной путь поезда при двухтрубной тормозной системе с утечками

**Рис. 5.** Полный тормозной путь грузового поезда, оборудованного однотрубной и двухтрубной тормозной системами в зависимости: а) от скорости движения; б) величины уклона

в 6 раз, с 49,92 кН для заведомо исправной системы до значения 8,11 кН, что привело также к увеличению полного тормозного пути для композиционных колодок с 869,19 до 3343,32 м. При исправной тормозной системе для прямого горизонтального участка пути при скорости движения 90 км/ч и расчетном тормозном коэффициенте  $\mathcal{G}_p = 0,21$  в пересчете на чугунные тормозные колодки тормозной путь поезда не должен превышать 1609 м [10].

Согласно правилам управления тормозами [16] для грузовых груженых поездов,

движущихся со скоростью 90 км/ч, расстояние ограждения мест внезапно возникших препятствий составляет 1500 м. Анализируя график, приведенный на рис. 5, б, видно, что при наличии утечек в тормозной системе с однотрубным питанием грузовой поезд даже при движении на прямом горизонтальном участке пути не сможет вовремя остановиться. Также становится небезопасным следование таких поездов на горно-перевальных участках профиля пути с уклонами свыше 6‰, особенно в зимнее время года, так как тормозной путь составит более

5 блок-участков. Помимо этого, также известны случаи «потери тормозов» в поездах вследствие истощимости. В большинстве случаев поезд останавливается только благодаря наличию контруклона.

### Заключение

Как мы можем видеть, тормозная система со сниженной эффективностью при однострубном питании не позволяет поезду остановиться в заданных пределах, следовательно, при некотором сочетании условий не может быть обеспечен требуемый уровень безопасности движения.

Решением данной проблемы будет являться модернизация тормозной системы с однострубным питанием путем обеспечения дополнительным питанием запасного резервуара через вторую трубу. По полученным в результате расчетов графикам мы можем видеть, что при такой же неисправности полный тормозной путь состава, оснащенного двухтрубным питанием, составляет 1456,21 м при композиционных тормозных колодках. То есть тормозной путь более чем на 50% увеличен у состава с однострубной тормозной системой. При организации двухтрубного питания тормозной путь в зависимости от величины уклона с неисправной тормозной системой длиннее на 20–30%, чем при однострубной тормозной системе без утечек, но при этом не превышает значений, установленных правилами управления тормозами. Таким образом можно сказать, что пневматическая автоматическая тормозная система с двухтрубным питанием позволяет значительно повысить безопасность движения грузовых поездов вне зависимости от профиля пути, особенно при условии наличия утечек.

### Библиографический список

1. Повышение веса поездов [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?accessible=true&id=157643>.
2. Иноземцев В. Е., Евсеев Д. Г., Куликов М. Ю. и др. Концепция альтернативной тормозной системы для подвижного состава // Транспортное машиностроение. 2022. № 10 (10). С. 42–48. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-10-42-48. EDN UFKWXM.
3. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Хамнаева А. А. и др. Теоретические исследования особенностей моделирования процесса фрикционного торможения поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 4 (68). С. 150–158. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4 (68).150-158. EDN ZPBFRRK.
4. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region / A. M. Khudonogov, I. A. Khudonogov, E. Y. Dulskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 May 2019. Vol. 760. M.: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018. EDN SONODF.
5. Козлов М. В. Организация обеспечения безопасности движения и автоматические тормоза / М. В. Козлов, Б. В. Смагин. М.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», 2020. 96 с. ISBN: 978-5-7473-1045-2. EDN TNEATY.
6. Абляимов О. С. Анализ эффективности тормозных систем скоростного подвижного состава / О. С. Абляимов, Ж. Д. Ходжиев, Б. И. Гайратов // Надежность функционирования и информационная безопасность инфокоммуникационных, телекоммуникационных и радиотехнических сетей и систем: Материалы всероссийской научно-технической кон-

ференции, Омск, 25 октября 2019 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. С. 234–241. EDN NXSQME.

7. Иванов П. Ю. Снижение энергопотребления электровоза при управлении пневматическими тормозами грузового поезда / П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, А. М. Худогов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : Материалы III Международной научно-практической конференции, Омск, 6 декабря 2018 года. Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2018. С. 143–151. EDN PBPJT.

8. Иванов П. Ю. Сравнительный анализ тормозных систем подвижного состава с однотрубным и двухтрубным питанием / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Хамнаева и др. // Вестник РГУПС. 2020. № 3. С. 35–42. DOI: 10.46973/0201-727X-2020-3-35.

9. Осипов Д. В., Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю. и др. Двухтрубная тормозная система на железнодорожном подвижном составе // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 4–5 (101–102). С. 38–41. EDN ZGBZCC.

10. Правила тяговых расчетов для поездной работы, 2016. 510 с.

11. Буйносов А. П. Совершенствование метода расчета длины тормозного пути железнодорожного подвижного состава / А. П. Буйносов, Е. В. Федоров // Известия Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 13–22. EDN XQXUXB.

12. Багашов С. И. Некоторые особенности расчета тормозной силы поезда / С. И. Багашов, А. А. Андреев // Проблемы безопасности российского общества. 2016. № 1. С. 131–136. EDN VVWJEN.

13. Асадченко В. Р. Расчет пневматических тормозов железнодорожного подвижного состава: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2004. 120 с.

14. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2006. 392 с.

15. Крылов В. И. Автоматические тормоза подвижного состава: учебник для учащихся техникумов ж.-д. трансп. / В. И. Крылов, В. В. Крылов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 360 с.

16. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. 2014.

Дата поступления: 08.12.2023

Решение о публикации: 13.02.2024

#### **Контактная информация:**

ОСИПОВ Дмитрий Валерьевич — аспирант;  
osipovdnor@mail.ru

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

ХАМНАЕВА Алена Александровна — ассистент  
кафедры УКиИГ; alenalend95@mail.ru

ПРОНИН Константин Евгеньевич — аспирант;  
prontom.irk@mail.ru

## Comparison of the length of the braking tracks of a freight train with single-pipe and double-tube power supply of the braking system

D. V. Osipov, P. Yu. Ivanov, A. A. Khamnaeva, K. E. Pronin

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

**For citation:** *Osipov D. V., Ivanov P. Yu., Khamnaeva A. A., Pronin K. E.* Comparison of the length of the braking tracks of a freight train with single-pipe and double-pipe power supply of the braking system // Proceedings of Petersburg Transport University, 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 156–168. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-156-16

### Abstract

**Objective:** to perform a comparative analysis of the length of the braking distance of a freight train with a single-pipe and two-pipe brake system supply. Based on the laboratory studies carried out, to identify the effect of the speed and amount of filling of brake cylinders on the calculated braking distance of freight rolling stock when using brake systems with two-pipe and single-pipe supply of a spare tank. These studies are aimed at improving the technical speed and safety of freight trains, as well as improving the efficiency of the braking system during cyclic braking, in order to reduce its depletion. **Methods:** analysis of the filling rate of the brake cylinders, in order to determine the time of preparation of the brakes for action, depending on the method of organizing the power supply of the brake system; comparison of the length of the preparatory and actual braking distance according to the method of speed intervals proposed in the Rules of traction calculations. It was also assumed that the train was braking to a complete stop on a straight horizontal section of the track, with air leaks from the brake cylinders throughout the train. **Results:** it was revealed that a two-pipe braking system allows to develop a significantly greater braking effect than a single-pipe braking system with a similar technical condition of the pneumatic train system. As a result, with the new method of powering the reserve tank, there is a significant reduction in the time required to prepare the brakes for action, as well as a reduction in the length of the full braking distance. **Practical significance:** it has been proven that the use of a new braking system will improve the efficiency of the braking system, which leads to a reduction in braking distance. This, in turn, will improve the safety and speed of trains along the sections, as well as increase the average weight of trains.

**Keywords:** valid braking distance, preparatory braking distance, single-pipe braking system, two-braking system, speed interval method, valid pressing brake pad, cast iron brake pad, composite brake pad.

### References

1. Povyshenie vesa poezdov [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?accessible=true&id=157643>. (In Russian)
2. Inozemcev V. E., Evseev D. G., Kulikov M. Ju. i dr. Konceptija al'ternativnoj tormoznoj sistemy dlja podvizhnogo sostava // Transportnoe mashinostroenie. 2022. № 10 (10). S. 42–48. DOI: 10.30987/2782–5957–2022–10–42–48. EDN UFKWXM. (In Russian)
3. Ivanov P. Ju., Dul'skij E. Ju., Hamnaeva A. A. i dr. Teoreticheskie issledovanija osobennostej modelirovaniya processa frikcionnogo tormozhenija poezdov // Sovremnyye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2020. № 4 (68). S. 150–158. DOI: 10.26731/1813–9108.2020.4(68).150–158. EDN ZPBFRK. (In Russian)
4. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region / A. M. Khudonogov, I. A. Khudonogov, E. Y. Dul'skiy, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 May 2019. Vol. 760. Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012018. DOI: 10.1088/1757–899X/760/1/012018. EDN SONODF.

5. Kozlov M. V. Organizacija obespechenija bezopasnosti dvizhenija i avtomaticheskie tormoza. M.: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "Rossijskij universitet transporta", 2020. 96 s. ISBN: 978-5-7473-1045-2. EDN TNEATY. (In Russian)
6. Abljalimov O. S. Analiz jeffektivnosti tormoznyh sistem skorostnogo podvizhnogo sostava // Nadezhnost' funkcionirovanija i informacionnaja bezopasnost' infokommunikacionnyh, telekommunikacionnyh i radiotekhnicheskikh setej i sistem: Materialy vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Omsk, 25 oktjabrja 2019 goda. Omsk: Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2019. S. 234–241. EDN NXSQME. (In Russian)
7. Ivanov P. Ju. Snizhenie jenergopotreblenija jelektrovoza pri upravlenii pnevmaticheskimi tormozami gruzovogo poezda // Razrabotka i jekspluatacija jelektrotehnicheskikh kompleksov i sistem jenergetiki i nazemnogo transporta: Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Omsk, 6 dekabrja 2018 goda. Omsk: Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2018. S. 143–151. EDN PPBPJT. (In Russian)
8. Ivanov P. Ju. Sravnitel'nyj analiz tormoznyh sistem podvizhnogo sostava s odnotrubnym i dvuhtrubnym pitaniem / P. Ju. Ivanov, E. Ju. Dul'skij, A. A. Hamnaeva i dr. // Vestnik RGUPS. 2020. № 3. S. 35–42. DOI: 10.46973/0201-727X-2020-3-35. (In Russian)
9. Osipov D. V., Ivanov P. Ju., Dul'skij E. Ju. i dr. Dvuhtrubnaja tormoznaja sistema na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave // Transport Rossijskoj Federacii. 2022. № 4–5 (101–102). S. 38–41. EDN ZGBZCC. (In Russian)
10. Pravila tjagovykh raschetov dlja poezdnoj raboty, 2016. 510 s. (In Russian)
1. Bujnosov A. P. Sovershenstvovanie metoda rascheta dliny tormoznogo puti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava // Izvestija Transsiba. 2018. № 1 (33). S. 13–22. EDN XQXUXB. (In Russian)
12. Batashov S. I. Nekotorye osobennosti rascheta tormoznoj sily poezda / S. I. Batashov, A. A. Andreev // Problemy bezopasnosti rossijskogo obshhestva. 2016. № 1. S. 131–136. EDN VVWJEH. (In Russian)
13. Asadchenko V. R. Raschet pnevmaticheskikh tormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie dlja vuzov zh.-d. transporta. M.: Marshrut, 2004. 120 s. (In Russian)
14. Asadchenko V. R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie dlja vuzov zh.-d. transporta. M.: Marshrut, 2006. 392 s. (In Russian)
15. Krylov V. I. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: uchebnik dlja uchashhihsja tehnikumov zh.-d. transp. / V. I. Krylov, V. V. Krylov. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1983. 360 s. (In Russian)
16. Pravila tehničeskogo obsluzhivanija tormoznogo oborudovanija i upravlenija tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. 2014. (In Russian)

Received: 08.12.2023

Accepted: 13.02.2024

**Author's information:**

Dmitry V. OSIPOV — Postgraduate Student;  
osipovdnor@mail.ru

Pavel Yu. IVANOV — PhD of technical sciences, Associate Professor; ivanov@mail.ru

Alyona A. KHAMNAEVA — Assistant at the UKiIG department; alenalend95@mail.ru

Konstantin E. PRONIN — Postgraduate Student;  
prontom.irk@mail.ru



УДК 656.224

## Модель организации сервисных услуг на железнодорожных вокзалах

**В. И. Ульяницкая**<sup>1, 2</sup>

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

<sup>2</sup> Региональный центр информационно-справочного сопровождения клиентов Северо-Западной региональной дирекции железнодорожных вокзалов — структурного подразделения Дирекции железнодорожных вокзалов — филиала открытого акционерного общества «Российские железные дороги», Россия, 195112, Санкт-Петербург, Заневский пр., 73

**Для цитирования:** Ульяницкая В. И. Модель организации сервисных услуг на железнодорожных вокзалах // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 169–177. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-169-177

### Аннотация

**Цель:** развитие сервисной деятельности на объектах инфраструктуры пассажирского комплекса с позиции пересмотра типового комплекта сервисных услуг (обязательных, дополнительных, сопутствующих), оказываемых пассажирам и клиентам на железнодорожных вокзалах. Пересмотрен и предложен набор услуг исходя из объема потребляемых услуг и фактических запросов клиентов. **Методы:** в работе используются методы эмпирического и экспериментально-теоретического уровня: наблюдение, анкетирование, сравнение, анализ данных и др. **Результаты:** даны практические примеры и рекомендации сервисных услуг для железнодорожных вокзалов за счет адаптивного перехода на разделение услуг в обслуживании клиентов (единое окно). **Практическая значимость:** в работе определен типовой набор сервисных услуг на вокзалах с последующей оценкой возможности их рассматривать в качестве корпоративного актива.

**Ключевые слова:** клиент, пассажир, сервис, набор услуг, информационные потоки, автоматизация, вокзальный комплекс.

### Введение

Основу деятельности сервиса любой организации составляет процесс оказания услуг с использованием прогрессивных и проактивных механизмов обеспечения качества обслуживания клиентов. Основная цель клиентоориентированности направлена на достижение удовлетворения потребностей клиентов в различного рода услугах (сервиса) и предоставления обратной связи как в режиме реального времени (по факту возникновения), так и в отложенном режиме (по факту потребности). В свою очередь,

выбор и использование оптимальных способов оказания услуг должен быть обеспечен за счет равного доступа к инфраструктуре, сервису, коммуникациям и информационным ресурсам пассажиров на объектах железнодорожного транспорта [1–3].

В случае организации и оказания услуг (в т. ч. информационно-справочных) на железнодорожных вокзалах компанией «РЖД» рассматривается совокупность административных и технических процессов, соответствующих ряду регламентируемых

параметров, при котором процесс находится в управляемом и рабочем состоянии. Как показывает практика, организация логических и технологических согласованных взаимодействий всеми участниками процесса оказания услуг позволяет на всем пути клиента отследить эффективность предпринимаемых действий и избежать разночтения требований пользователями к одной и той же услуге на разных объектах пассажирской инфраструктуры [4, 5]. Информационные и телекоммуникационные технологии занимают существенную долю оказываемых услуг на железнодорожных вокзалах. Информация становится предметом массового потребления. Сейчас огромное количество наличия легальных и свободных каналов коммуникаций, где пассажир может получить необходимую ему информацию или услугу не только в печатном виде, но и в электронном формате. Отсюда следует, что доступ и требования к порядку ее предоставления должны обеспечиваться регламентирующими документами и техническими возможностями на объектах, где она оказывается [6–8].

Рассмотрим в статье общую тенденцию перехода сервисных услуг на вокзальных комплексах на новый уровень, а именно автоматизацию части услуг, задействованных в обслуживании клиентов.

### **Сервисная деятельность вокзальных комплексов**

Железнодорожные вокзалы ежедневно обслуживают огромные потоки пассажиров и клиентов, являясь не только пунктами отправления, прибытия или пунктами массовой пересадки (межвидового трансфера), но и объектами оказания массовых услуг. Вокзальный комплекс рассматривается уже как обобщенный комплекс архитектурно-

планировочных решений с учетом прогрессивных технологий и спроса на услуги от пассажиров. Развитие и совершенствование технологий вокзальной работы в увязке с новыми проектами (ОАО «РЖД», города, инвесторов) по улучшению обслуживания пассажиров становится центральным к формированию изменений набора предлагаемых услуг.

Набор услуг, предоставляемых для пассажиров и клиентов на территории железнодорожного вокзала, зависит от класса вокзала, который определяется его пропускной способностью и единовременной вместимостью. Развитие городских транспортных систем, логистики требует пересмотра подхода к классности и технических, и общественно социальных, и деловых функций вокзалов. Вопрос необходимо рассматривать шире, отталкиваясь не только от объемов пассажиропотока, а также от социально ориентированного производственного комплекса, связанного своим функционалом с жизнью транспортной системы города, прилегающими территориями, работой городского транспорта.

Основные опции услуг подразделены на следующие виды деятельности:

- 1) организация обслуживания пассажиров и клиентов вокзалов;
- 2) предоставление услуг инфраструктуры перевозчикам пассажиров;
- 3) предоставление на правах аренды перевозчикам и арендаторам площадей на территории вокзалов;
- 4) эксплуатация и содержание пассажирской инфраструктуры в исправном техническом состоянии.

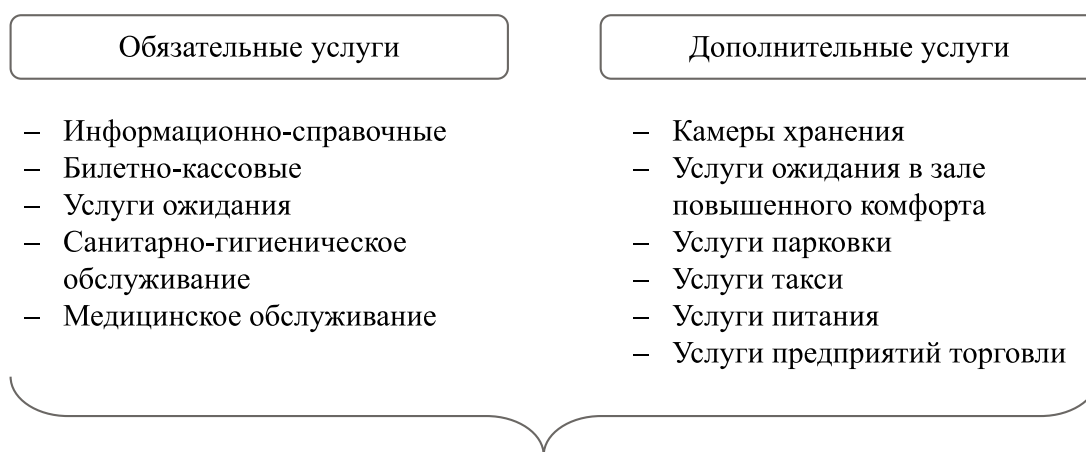
В работе рассмотрим основной вид деятельности (операции, видимые для пассажира), а именно требования к обслуживанию пассажиров и клиентов на железнодорожном

вокзале. Унифицированные требования подразделяются на обязательные и дополнительные, являясь классическими, однако с учетом влияния дополнительных факторов развития и условий повышения требований к сервису со стороны пассажиров и клиентов можно выделить третью группу — сопутствующих услуг [9, 10]. Рассмотрим установленный минимальный состав обязательных и дополнительных услуг, оказываемых на железнодорожных вокзалах (рис. 1).

Фактически классность вокзального комплекса (вокзала) является основополагающей к минимальному перечню услуг, необходимых для обеспечения надлежащего качества для получения пассажиром и посетителем в период нахождения на вокзале. Отметим, что услуги по поддержанию общественного порядка и обеспечению транспортной безопасности пассажиров и посетителей на объектах пассажирской инфраструктуры регламентируются требованиями Федерального закона «О транспортной безопасности» [11] и должны обеспечиваться независимо от категории и классности вокзального комплекса.

Таблица 1 представляет собой фрагмент исследований по типовому набору основных видов сервисных услуг, применимых на вокзалах, которые можно рассматривать в качестве корпоративного актива с дальнейшей реализацией, на основе данных о существующих объектах пассажирской инфраструктуры, их мощностях, оснащенности и характеристиках (табл. 1).

Четко прослеживается тенденция к тому, что скоро классность вокзала не будет диктовать наличие той или иной дополнительной и сопутствующей услуги. Очевидно, что многообразие сервисных услуг, с одной стороны, учитывает спрос и базовые потребности населения, с другой — требует тщательной экономической и технической оценки целесообразности внедрения новых решений [12–15]. Так, объективно организация многих сфер услуг не востребована на некоторых объектах пассажирской инфраструктуры, но при этом есть условия запроса, когда определенный вид сервиса необходим по ряду причин. Объективно, например, услуги правового характера зачастую востребованы



\* с учетом обеспечения: транспортной безопасности пассажиров и посетителей и равной доступности пассажирской инфраструктуры и услуг для маломобильных групп населения

**Рис. 1.** Состав обязательных и дополнительных услуг на железнодорожных вокзалах

ТАБЛИЦА 1. Предлагаемый типовой набор сервисных услуг, оказываемых пассажирам и посетителям в зависимости от класса вокзала

№	Вид услуги	Классность вокзала				
		внеклассный	I класс	II класс	III класс	IV класс
1	Транспортно-экспедиторские услуги	о	о	о	о	о
2	Услуги безопасности	о	о	о	о	о
3	Социально-бытовые	о	о	о	о	о
4	Социально-медицинские	о	о	о	о	о
5	Услуги связи и информации	о	о	о	о	о
6	Услуги торговли и общественного питания, услуги рынков	о	о	о	о	о
7	Социально-культурные (развлекательные, туристические, экскурсионные услуги)	о	о	о	р	р
8	Услуги правового характера (юридические)	о	р	р	н	н
9	Социально-трудовые	р	р	р	н	н
10	Услуги банков (финансовые)	о	о	р	р	р
11	Посреднические (недвижимость, курьерские)	о	о	р	н	н
...n	Прочие услуги населению	р	р	р	–	–

Условные обозначения: о — обязательны, р — рекомендованы (дополнительные, сопутствующие), н — не востребованы, «–» — оценка не производилась.

на крупных транспортно-пересадочных узлах, но если проанализировать локальный вокзал, условия и запросы клиентов, то может оказаться, что данные услуги и их составляющие необходимы на вокзале более низкого класса, так как географически он находится на стыке транспортного узла или в составе города с внутренней трудовой миграцией. Другой пример — железнодорожная станция Сортавала, когда вокзал уже рассматривается как центр туристической агломерации, что требует высокого сервиса услуг и клиентского обслуживания с учетом возможных потребностей пассажиров (культурно-досуговые услуги; услуги риелторов, трансфера; услуги фото-, видеосопровождения; услуги перевода и пр.).

Развитие непрофильной деятельности на вокзалах может повысить лояльность к компании, а мнение пассажиров и клиентов об услугах, предоставляемых на объектах пассажирской инфраструктуры, определит отдельный механизм формирования общественного настроения и комплексной оценки удовлетворенности пассажиром услугами железнодорожного транспорта [16–18]. Обратная связь станет именно тем звеном выявления резервов развития (совершенствования) деятельности вокзальных комплексов с целью повышения качества обязательных, дополнительных, сопутствующих услуг, предоставляемых пассажирам (или клиентам) на всем этапе жизненного цикла пассажирских перевозок.

## Заключение

Сейчас в крупных агломерациях вокзалы выполняют функцию не только держателя инфраструктуры с базовыми требованиями, но и зачастую имеют направленность транспортно-логистических комплексов и торгово-развлекательных центров крупного формата. Прослеживается тренд, когда основные задачи организации обслуживания пассажиров и содействия им не ограничиваются набором обязательных услуг, предоставляемых пассажирам и клиентам на территории железнодорожных вокзалов и вокзальных комплексов различных классов, а рассматривается шире, а именно в удовлетворении и обеспечении потребностей населения в информационно-консультативных, социально-культурных услугах (рис. 2), бытовых, юридических и пр.

Конечно, формирование дополнительных и сопутствующих услуг не происходит повсеместно и хаотично. Центром внедрения чаще всего выступают вокзальные ком-

плексы в крупных агломерациях, имеющие большой пассажиропоток. Именно крупные города чаще всего быстрее адаптируются к изменениям и модернизациям (переход на автоматизацию и цифровые услуги) и готовы учиться чему-то новому. Реакция пассажира на месте (анкетирование, опросы) или по истечении определенного времени (методика расчета индекса удовлетворенности [12]) и дает курс на стратегическое развитие тех или иных проектов.

Первоочередная задача Дирекции железнодорожных вокзалов как исполнителя услуги — определить, с какого процесса начать изменения. Если взглянуть на весь спектр предлагаемых услуг, станет очевидным, что основным источником получения информации о потребностях услуг населением всегда будет обратная связь в любом ее проявлении. Потребность пассажира складывается из трех критериев по отношению к услуге: время + цена + информация (о чем-то, от кого-то, для кого-то). И все три



**Рис. 2.** Культурно-историческая выставка на Ладожском и Московском вокзалах Октябрьской железной дороги в июне – июле 2022 года

критерия процесса должны контролироваться и нивелироваться исходя из потребности клиента за счет повышения качества сервисного обслуживания и ориентации на запрос клиента.

### **Благодарности:**

Автор выражает признательность научному руководителю О. Д. Покровской (докт. техн. наук, доц.) заведующей кафедрой «Управление эксплуатационной работой» ФГБОУ ВО ПГУПС, за оказанную помощь и наставления при планировании и проведении исследования.

### **Библиографический список**

1. Информационное общество в Российской Федерации: стат. сб. / Г. И. Абдрахманова, Л. М. Гохберг, О. Ю. Дудорова и др. М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2017. 328 с. ISBN: 978-5-7598-1719-2. EDN XYLSVN.
2. Семиглазов В. А. Организация и планирование деятельности предприятий сервиса: учеб. пос. Томск: Кафедра ТУ, ТУСУР, 2016. 164 с.
3. Ульяницкая В. И., Покровская О. Д. Триггерный эффект пассажира // Техник транспорта: образование и практика. 2022. Т. 3, вып. 4. С. 429–434. DOI: 10.46684/2687–1033.2022.4.429–43.
4. Костина С. Н. Организация предоставления государственных и муниципальных услуг / С. Н. Костина, Г. А. Банных, Л. И. Воронина // Учебное пособие. М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 123 с.
5. Фионова Л. Р. Разработка модели процесса оказания услуги / Л. Р. Фионова, Ю. Ю. Фионова // Теория и практика общественного развития. 2015. № 15. С. 38–41 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-protsessa-okazaniya-uslugi> (дата обращения: 10.02.2024).
6. Гурфова Р. В. Развитие информационного общества в России» / Р. В. Гурфова, К. С. Шумахова // Научные известия. 2019. № 15. С. 36–39 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-informatsionnogo-obschestva-v-rossii-1> (дата обращения: 10.12.2023).
7. Скоробогатых И. И. Обеспечение конкурентоспособности вокзальных комплексов мегаполиса на основе оценки востребованности торговых сервисов / И. И. Скоробогатых, Т. В. Муртузалиева, И. П. Широценская и др. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2021. Т. 20, № 4. С. 509–538. EDN GGDSOR.
8. Управление эксплуатационной работой на транспорте (Уэрт-2022): сб. тр. Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 марта 2022 года; под ред. А. Ю. Панычева, Т. С. Титовой, О. Д. Покровской. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. 378 с. ISBN: 978-5-7641-1807-9. EDN EQHOLM.
9. Стандарт ОАО «РЖД» «Управление железнодорожными вокзальными комплексами. Основные положения». Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 2 ноября 2020 г. № 2412/р. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 10.02.2024).
10. ГОСТ Р 58171–2018 «Услуги на железнодорожном транспорте. Требования к обслуживанию пассажиров на вокзальных комплексах». Утвержден приказом Росстандарта от 6 июля 2018 г. № 400-ст, применяется в ОАО «РЖД» с 15 апреля 2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159795>. (дата обращения: 10.02.2024).
11. Федеральный закон от 9 февраля 2007 г. № 16-ФЗ «О транспортной безопасности» // Собрание законодательства РФ. Выпуск № 7. ст. 837–2007. 8 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link\\_id=0&nd=102111823&intelsearch=&firstDoc=1](http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=0&nd=102111823&intelsearch=&firstDoc=1) (дата обращения: 10.02.2024).

12. Mangat A. S., Mangler J., Rinderle-Ma S. Interactive Process Automation based on lightweight object detection in manufacturing processes // *Computers in Industry*. September 2021. Vol. 130. 103482. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103482.
13. Кубичек В. В., Килькеева Ю. А. Совершенствование системы управления качеством обслуживания пассажиров в аэропортах России // *Вестник Академии знаний*. 2020. № 4 (39). С. 235–244 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-sistemy-upravleniya-kachestvom-obsluzhivaniya-passazhirov-v-aeroportah-rossii> (дата обращения: 10.02.2024).
14. Rupp N., Peschke K., Köppl M., et al. Establishment of low-cost laboratory automation processes using AutoIt and 4-axis robots // *SLAS Technology* Available online 10 July 2022. DOI: 10.1016/j.slast.2022.07.001.
15. Свиридчук Г. П. Размещение остановочных пунктов пассажирских поездов в больших городах и городских агломерациях // *Вестник ГГУ*. 2017. № 3. С. 83–86 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razmeschenie-ostanovochnyh-punktov-passazhirskih-poezdov-v-bolshih-gorodah-i-gorodskih-aglomeratsiyah> (дата обращения: 10.02.2024).
16. Единая методика оценки уровня удовлетворенности пассажиров качеством услуг железнодорожного транспорта. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2021 г. № 3041/р. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 10.02.2024).
17. Боловинцев М. Ю. Организация работы вокзальных комплексов и транспортно-пересадочных узлов / М. Ю. Боловинцев, М. М. Зязиков // *StudNet*. 2021. № 6. С. 2147–2171 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raboty-vokzalnyh-kompleksov-i-transportno-peresadochnyh-uzlov> (дата обращения: 10.02.2024).
18. Séguin S., Tremblay H., Benkalaï I., et al. Minimizing the number of robots required for a Robotic Process Automation (RPA) problem, *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 192. P. 2689–2698. DOI: 10.1016/j.procs.2021.09.039.

Дата поступления: 10.12.2023

Решение о публикации: 20.02.2024

**Контактная информация:**

УЛЬЯНИЦКАЯ Виктория Игоревна — аспирант;  
[ulyanickaya\\_viktoriya@mail.ru](mailto:ulyanickaya_viktoriya@mail.ru)

## The model of the organization of services at railway stations

V. I. Ulyanitskaya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> Regional Center for Information and reference support for clients of the North-Western Regional Directorate of Railway Stations, a structural division of the Directorate of Railway Stations, a branch of the Open Joint Stock Company Russian Railways, 73, Zanevsky ave., St. Petersburg, 195112, Russia

**For citation:** *Ulyanitskaya V. I.* The model of the organization of services at railway stations // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 169–177. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-169-177

## Abstract

**Objective:** the development of service activities at the infrastructure facilities of the passenger complex from the perspective of revising the standard set of services (mandatory, additional, related) provided to passengers and customers at railway stations. A set of services has been revised and proposed based on the volume of services consumed and actual customer requests. **Methods:** the work uses methods of empirical and experimental-theoretical level: observation, questioning, comparison, data analysis, etc. **Results:** practical examples and recommendations of services for railway stations are given, due to the adaptive transition to the separation of services in customer service (“single window”). **Practical significance:** the paper defines a typical set of services at railway stations, with a subsequent assessment of the possibility of considering them as a corporate asset.

**Keywords:** customer, passenger, service, set of services, information flows, automation, railway station complex.

## References

1. Informacionnoe obshchestvo v Rossijskoj Federacii: stat. sb. / G. I. Abdrahmanova, L. M. Gohberg, O. Ju. Dudorova i dr. M.: Nacional’nyj issledovatel’skij universitet “Vysshaja shkola jekonomiki”, 2017. 328 s. ISBN: 978-5-7598-1719-2. EDN XYLSVN. (In Russian)
2. Semiglazov V. A. Organizacija i planirovanie dejatel’nosti predpriyatij servisa: ucheb. pos. Tomsk: Kafedra TU, TUSUR, 2016. 164 s. (In Russian)
3. Ul’janickaja V. I., Pokrovskaja O. D. Triggernyj jeffekt passazhira // *Tehnik transporta: obrazovanie i praktika*. 2022. T. 3, vyp. 4. S. 429–434. DOI: 10.46684/2687–1033.2022.4.429–43. (In Russian)
4. Kostina S. N. Organizacija predostavlenija gosudarstvennyh i municipal’nyh uslug / S. N. Kostina, G. A. Bannyh, L. I. Voronina // *Uchebnoe posobie. M-vo nauki i vyssh. obrazovanija Ros. Federacii, Ural. feder. un-t. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta*, 2019. 123 s. (In Russian)
5. Fionova L. R. Razrabotka modeli processa okazanija uslugi / L. R. Fionova, Ju. Ju. Fionova // *Teorija i praktika obshhestvennogo razvitija*. 2015. № 15. S. 38–41 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-protsessa-okazaniya-uslugi> (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)
6. Gurfova R. V. Razvitie informacionnogo obshchestva v Rossii / R. V. Gurfova, K. S. Shumahova // *Nauchnye izvestija*. 2019. № 15. S. 36–39 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-informacionnogo-obshchestva-v-rossii-1> (data obrashhenija: 10.12.2023). (In Russian)
7. Skorobogatyh I. I. Obespechenie konkurentosposobnosti vokzal’nyh kompleksov megapolisa na osnove ocenki vostrebovannosti togovykh servisov / I. I. Skorobogatyh, T. V. Murtuzaliev, I. P. Shirochenskaja i dr. // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment*. 2021. T. 20, № 4. S. 509–538. EDN GGDSOR. (In Russian)
8. Upravlenie jekspluatacionnoj rabotoj na transporte (Ujert-2022): sb. tr. Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 15–16 marta 2022 goda; pod red. A. Ju. Panycheva, T. S. Titovoj, O. D. Pokrovskoj. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2022. 378 s. ISBN: 978-5-7641-1807-9. EDN EQHOLM. (In Russian)
9. Standart OAO “RZhD” “Upravlenie zheleznodorozhnymi vokzal’nymi kompleksami. Osnovnye polozhenija”. Utverzhden rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 2 nojabrja 2020 g. № 2412/r. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.consultant.ru/> (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)
10. GOST R 58171–2018 “Uslugi na zheleznodorozhnom transporte. Trebovanija k obsluzhivaniju passazhиров na vokzal’nyh kompleksah”. Utverzhden prikazom Rosstandarta ot 6 ijulja 2018 g. № 400-st, primenjaetsja v OAO “RZhD” s 15 aprelja 2021 g. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159795> (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)



11. Federal'nyj zakon ot 9 fevralja 2007 g. №16–FZ “O transportnoj bezopasnosti” // Sobranie zakonodatel'stva RF. Vypusk № 7. st. 837–2007. 8 s. [Jelektronnyj resurs]. URL: [http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link\\_id=0&nd=102111823&intel-search=&firstDoc=1](http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=0&nd=102111823&intel-search=&firstDoc=1) (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)
12. Mangat A. S., Mangler J., Rinderle-Ma S. Interactive Process Automation based on lightweight object detection in manufacturing processes // *Computers in Industry*. Vol. 130. September 2021, 103482. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103482.
13. Kubichek V. V., Kil'keeva Ju. A. Sovershenstvovanie sistemy upravlenija kachestvom obsluzhivaniya passazhirov v ajeroportah rossii // *Vestnik Akademii znaniy*. 2020. № 4 (39). S. 235–244 [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-sistemy-upravleniya-kachestvom-obsluzhivaniya-passazhirov-v-aeroportah-rossii> (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)
14. Rupp N., Peschke K., Köppl M., et al. Establishment of low-cost laboratory automation processes using AutoIt and 4-axis robots // *SLAS Technology* Available online 10 July 2022. DOI: 10.1016/j.slast.2022.07.001.
15. Sviridchuk G. P. Razmeshhenie ostanovochnyh punktov passazhirskih poezdov v bol'shih gorodah i gorodskih aglomeracijah // *Vestnik GUU*. 2017. № 3. S. 83–86 [Jelektronnyj resurs]. URL: [ka.ru/article/n/razmeschenie-ostanovochnyh-punktov-passazhirskih-poezdov-v-bolshih-gorodah-i-gorodskih-aglomeratsiyah](https://cyberleninka.ru/article/n/razmeschenie-ostanovochnyh-punktov-passazhirskih-poezdov-v-bolshih-gorodah-i-gorodskih-aglomeratsiyah) (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)
16. Edinaja metodika ocenki urovnja udovletvorenosti passazhirov kachestvom uslug zheleznodorozhnogo transporta. Utverzhdena rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 29 dekabrya 2021 g. № 3041/r. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.consultant.ru/> (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)
17. Bolovincev M. Ju. Organizacija raboty vokzal'nyh kompleksov i transportno-peresa-dochnyh uzlov / M. Ju. Bolovincev, M. M. Zjazikov // *StudNet*. 2021. № 6. S. 2147–2171 [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raboty-vokzalnyh-kompleksov-i-transportno-peresadochnyh-uzlov> (data obrashhenija: 10.02.2024). (In Russian)
18. Séguin S., Tremblay H., Benkalaï I., et al. Minimizing the number of robots required for a Robotic Process Automation (RPA) problem, *Procedia Computer Science*. Vol. 192, 2021. R. 2689–2698. DOI: 10.1016/j.procs.2021.09.039.

Received: 10.12.2023

Accepted: 20.02.2024

**Author's information:**

Victoria I. ULYANITSKAYA — Postgraduate Student;  
[ulyanickaya\\_viktoriya@mail.ru](mailto:ulyanickaya_viktoriya@mail.ru)

УДК 656.27

## Совершенствование транспортных технологических процессов железнодорожной сети

**К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин**

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

**Для цитирования:** Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Совершенствование транспортных технологических процессов железнодорожной сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 178–186. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-178-186

### Аннотация

**Цель:** повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной сети за счет взаимовыгодного взаимодействия линий различных категорий. **Методы:** применены методы теории управления, системного анализа, синтеза и математического моделирования. **Результаты:** усовершенствован инструментарий определения оптимального расположения логистических центров методом центра тяжести за счет учета критериев минимизации транспортных затрат, категории, специализации и социальной значимости линии, а также определения весовых значений критериев с использованием метода анализа иерархий. **Практическая значимость:** предлагаемый инструментарий позволяет определить местоположение логистического центра на пересечении интенсивных и малоинтенсивных железнодорожных линий с учетом критериев минимизации транспортных затрат, специализации линии и социальной значимости линий для рассматриваемых регионов.

**Ключевые слова:** малоинтенсивные железнодорожные линии, интенсивные линии, метод центра тяжести, метод анализа иерархий.

### Введение

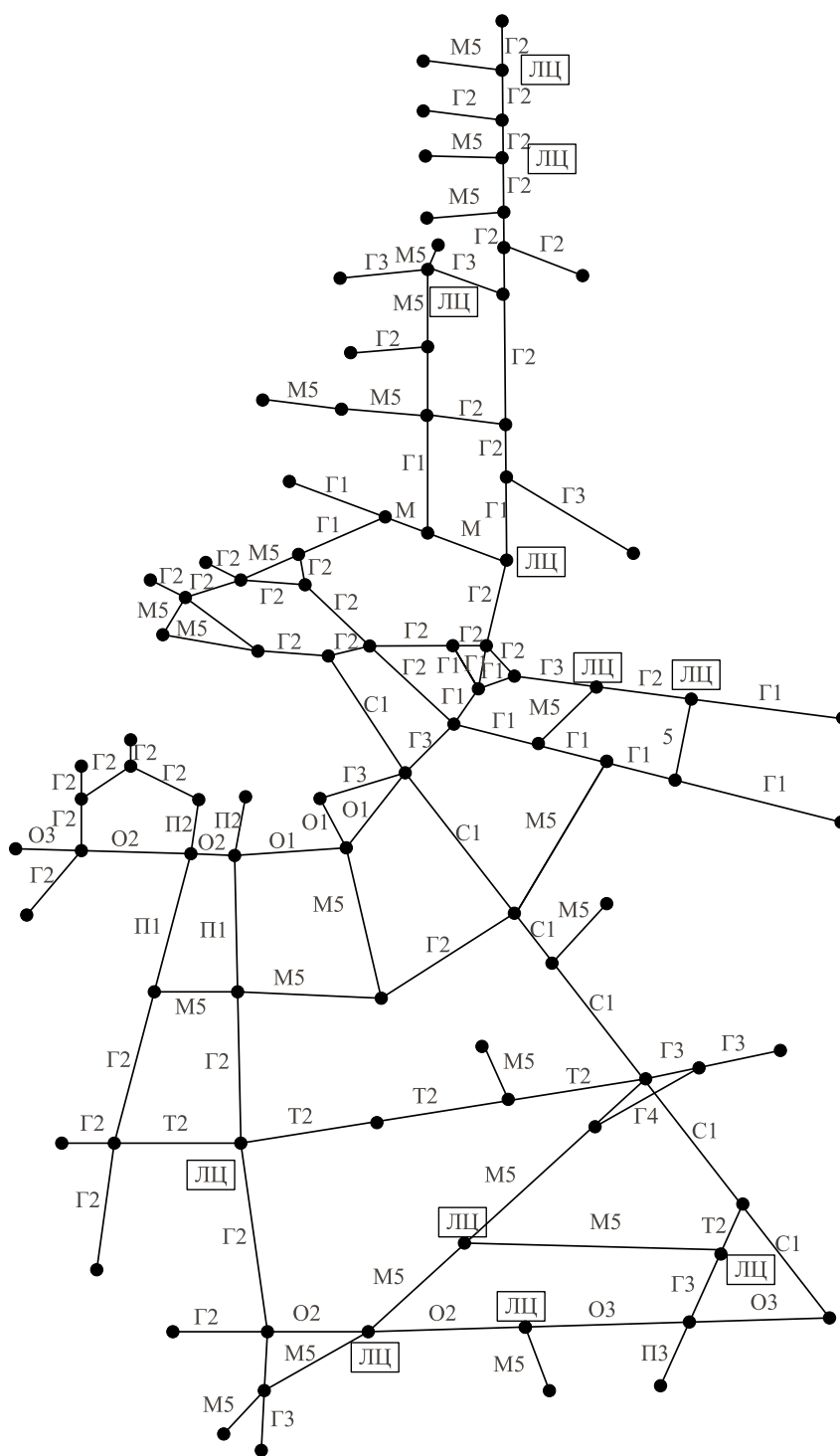
В соответствии с действующими нормативными документами железнодорожная транспортная сеть имеет следующую специализацию линий [1]: высокоскоростные; скоростные; с преимущественно пассажирским движением; с преимущественно грузовым движением; особо грузонапряженные; с тяжеловесным грузовым движением; малоинтенсивные линии, а также классы с 1-го до 5-го, в зависимости от приведенной грузонапряженности и технической скорости.

В общем виде железнодорожную транспортную сеть можно представить в виде графика (рис. 1), состоящего из железнодорожных узлов и линий, имеющих буквенное

обозначение специализации линии и цифровое обозначение класса железнодорожной линии.

В результате анализа и обобщения работ по железнодорожным линиям различных классов и специализации [2–9] систематизированы научные исследования и представлены в виде матрицы (рис. 2).

На основании анализа следует, что требуют проведения дополнительных исследований малоинтенсивных линий (МИЛ). Под МИЛ понимается железнодорожный участок с низкими размерами движения грузовых и пассажирских поездов (не более 8 пар поездов/сутки и приведенная грузонапряженность менее



Условные обозначения:

Высокоскоростная железнодорожная линия (В); Скоростная железнодорожная линия (С); Железнодорожная линия с преимущественно пассажирским движением (П); Железнодорожная линия с преимущественно грузовым движением (Г); Особо грузонапряженная железнодорожная линия (О); Железнодорожная линия с тяжеловесным грузовым движением (Т); Малоинтенсивные линии (М); транспортные узлы — ●; железнодорожные линии — — ; ЛЦ — логистические центры, 1–5 классы железнодорожных линий.

**Рис. 1.** Железнодорожная транспортная сеть, состоящая из линий различных классов и специализации

Факторы Специализация линий	Политика	Экономика	Техника	Технологии	Социум	Параметры специализации	Математические модели и методы транспортно- технологических процессов	Теоретические основы
Высокоскоростные	■	■	■	■	■	■	■	■
Скоростные	■	■	■	■	■	■	■	■
С преимущественно пассажирским движением	■	■	■	■	■	■	■	■
С тяжеловесным грузовым движением	■	■	■	■	■	■	■	■
Особо грузонапряженные	■	■	■	■	■	■	■	■
С тяжеловесным грузовым движением	■	■	■	■	■	■	■	■
Малонитенсивные линии	■	■	■	■	■	■	■	■
Критерии	Законодательство, нормативные акты, тарифы	Объем инвестиций, стоимость услуг, доходы от перевозки грузов и пассажиров, уровень занятости населения	Производительность, эффективность, надежность, долговечность, простота использования	Эффективность, экономичность, удобство использования, экологичность	Уровень доходов, возрастная структура, плотность населения, транспортная мобильность населения	Грузооборот, пассажирооборот, скорость движения поездов, количество поездов	Математическое, имитационное моделирование	Концепции, подходы, закономерности

Степень изученности: ■ высокая ■ средняя ■ низкая

Рис. 2. Матрица исследований в области железнодорожных линий различной специализации

5 млн т-км брутто/км в год), при этом затраты на функционирование линии больше, чем получаемый доход от всех видов деятельности, либо затраты и доходы равны.

В связи с тем, что линия является убыточной или самоокупаемой, можно считать ее функционирование неэффективным. Эффективным же функционирование линии можно считать, если она приносит чистый доход. При этом доход может быть получен как от перевозочной деятельности, так и от непрофильной деятельности (предоставления прочих услуг).

Предлагается в рамках данного исследования декомпозировать специализацию железнодорожных линий на две категории:

линии других специализаций (ЛДС) и малонитенсивные (МИЛ). Декомпозиция вызвана тем, что МИЛ и ЛДС испытывают различные (зачастую противоречивые) проблемы функционирования. В этой связи объектом исследования являются пункты их стыкования.

Представленная декомпозиция упрощает выбор инструментария решения задач идентификации и управления перевозочными процессами для обеспечения эффективного функционирования железнодорожной транспортной сети.

К проблемам функционирования ЛДС относятся: потребность в больших объемах пропускной способности и высокой степени надежности инфраструктуры; большое

негативное воздействие на экологию; необходимость обеспечения высокого уровня безопасности объектов транспортной инфраструктуры; потребность в большом количестве квалифицированного персонала.

К проблемам функционирования МИЛ относятся: низкие размеры движения пассажирских и грузовых поездов; низкая грузо-напряженность; высокая социальная значимость линии для проживающего населения; большой срок окупаемости инвестиционных проектов ввиду низкой доходности линии; убыточность линий; кадровые проблемы; существенные затраты на содержание инфраструктуры.

Перечисленные проблемы функционирования ЛДС и МИЛ можно устранить за счет развития логистических центров на пересечении линии различных категорий, для повышения эффективности процесса перегрузки грузов и сокращения времени простоя подвижного состава, что позволит формировать новые услуги и продукты, к которым относятся: экспресс-перевозки в труднодоступные регионы, контейнерные перевозки, доставка грузов от двери до двери. Реализация новых услуг позволит привлечь дополнительных клиентов и повысить эффективность функционирования МИЛ.

Логистические центры на пересечении линии различных категорий позволяют консолидировать грузы с других видов транспорта, в том числе в адрес железнодорожных станций, расположенных на МИЛ, что позволит использовать транзитный потенциал таких линий.

### **1. Инструментарий определения расположения логистических центров**

Наиболее востребованный инструментарий определения расположения логистических центров включает следующие методы:

1. Метод центра тяжести, основанный на том, что грузопоток между двумя точками пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.
2. Метод сетевого анализа для моделирования транспортных сообщений и определения оптимального распределения ресурсов с учетом сетевой структуры.
3. Определение оптимального местоположения логистического центра на основе использования пространственных данных, картографии и геоинформационных систем.

В результате исследования определен адаптивный метод для определения расположения логистических центров реализации транспортных технологических процессов железнодорожной сети. В этой связи предлагается усовершенствовать метод центра тяжести за счет учета нескольких критериев, таких как минимизация транспортных затрат, категории и специализации и социальной значимости линии.

### **2. Задача определения оптимального расположения опорного логистического центра в условиях взаимодействия линий различных категорий**

Решение задачи рассмотрим на примере. Имеется три потенциальных местоположения для опорного логистического центра ОЛЦ (А, В, С), расположенных в разных регионах с различной транспортной доступностью (рис. 3).

Опорный логистический центр (ОЛЦ) представляет собой комплекс сооружений и устройств, предназначенный для хранения, обработки, переработки, распределения грузов и оптимизации транспортных процессов для снижения затрат на перевозку.

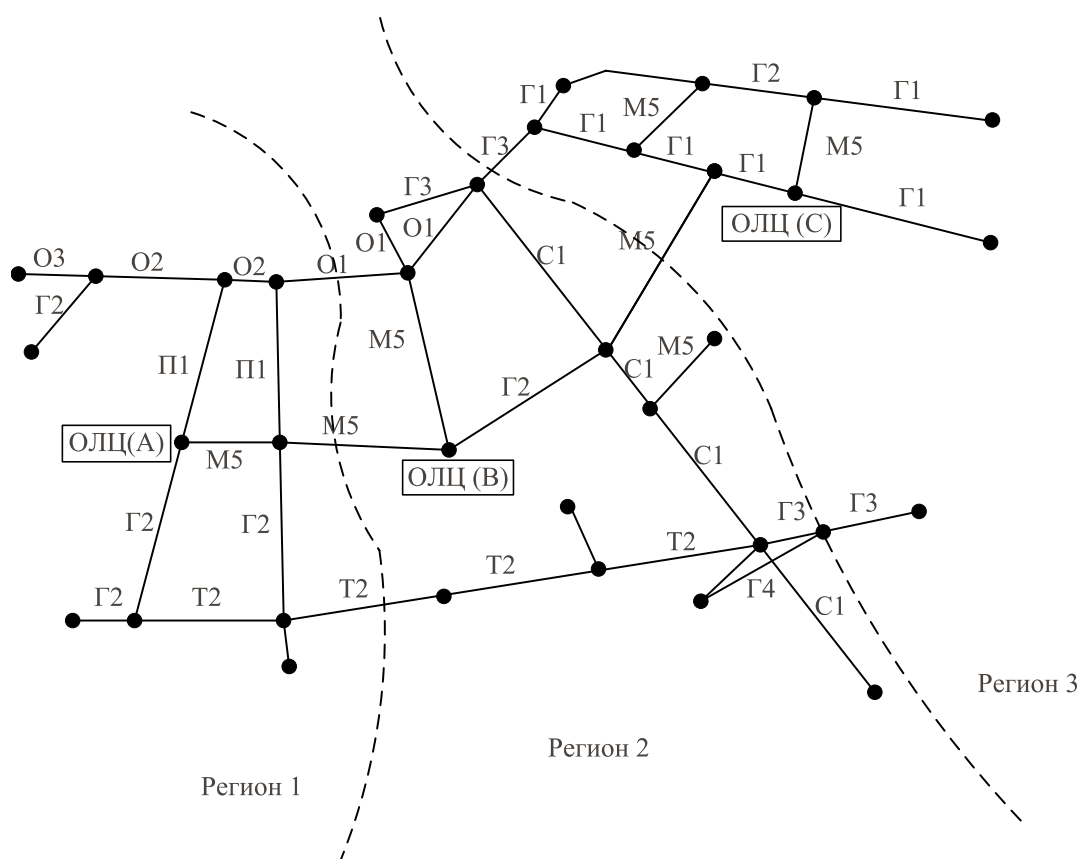


Рис. 3. Схема расположения потенциальных опорных логистических центров (ОЛЦ)

Необходимо найти наилучшее расположение ОЛЦ с учетом критериев транспортных затрат на переработку 1 т груза, категории и специализации примыкающих железнодорожных линий, а также социальной значимости линии.

Решение задачи осуществляется поэтапно.

*Этап 1.* Исходные данные представлены в табл. 1.

*Этап 2.* Определение значимости ОЛЦ на основе усовершенствованного метода центра тяжести.

Для усовершенствования метода центра тяжести и решения задачи векторной оптимизации увеличено количество учитываемых критериев, а также предложено определять их весовые коэффициенты с помощью метода анализа иерархий.

Значимость каждого из ОЛЦ определяется по выражению:

$$X_{\text{ОЛЦ}} = k_T \cdot T + k_K \cdot K + k_C \cdot C + k_A \cdot A \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $k_T, k_K, k_C, k_A$  — весовые значения каждого из критериев.

Для определения весовых значений критериев существуют математические методы экспертных оценок, анализа иерархий, машинного обучения, нечеткой логики, генетических алгоритмов и другие.

*Этап 3.* Определение весовых значений критериев.

Для определения весовых значений критериев выбран метод анализа иерархий (МАИ) [10], позволяющий структурировать сложные задачи, разбивая их на более мелкие

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные

ОЛЦ	Транспортные затраты на переработку 1 т груза, руб./т (Т)	Категории примыкающих железнодорожных линий (в диапазоне от 1 до 5) (К)	Специализация примыкающих железнодорожных линий (в диапазоне от 1 до 7) (С)	Социальная значимость линии (в диапазоне от 1 до 10) (А)
А	84	2,4,5,5	3,2,7,7	8
В	84	5,5,2	7,7,3	4
С	84	2,2,5	2,2,7	7

элементы, устанавливая иерархию критериев и альтернатив. МАИ позволяет выполнять вычисления в условиях неопределенности и нечеткости экспертных оценок и исходных данных. Выбранный метод определения весовых значений критериев позволяет вносить корректирующие воздействия в иерархию при изменении внешних условий и появлении дополнительных критериев.

Таким образом, матрица попарных сравнений критериев для ОЛЦ, составленная с использованием метода экспертных оценок, имеет вид:

$$E_{\text{лц}} = \begin{matrix} & T & K & C & A \\ T & 1 & 3 & 3 & 4 \\ K & 1/3 & 1 & 2 & 5 \\ C & 1/3 & 1/2 & 1 & 6 \\ A & 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1 \end{matrix}$$

Собственный вектор матрицы [10]:

$$V = (7,856; 4,203; 3,209; 1).$$

Сумма элементов матрицы:

$$W_s = \begin{pmatrix} 11 \\ 8,333 \\ 7,833 \\ 1,617 \end{pmatrix}$$

$$S = 11 + 8,333 + 7,833 + 1,617 = 28,783.$$

Приближенное значение главного собственного вектора:

$$W = \begin{pmatrix} 0,382 \\ 0,29 \\ 0,272 \\ 0,0562 \end{pmatrix}.$$

Приближенное значение максимального собственного значения:

$$\lambda_{\text{max}} = E_{\text{лц}} \cdot W;$$

$$\lambda_{\text{max}} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 6 \\ 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,382 \\ 0,29 \\ 0,272 \\ 0,0562 \end{pmatrix} = 4,672.$$

Нормированный собственный вектор:

$$W = (0,382; 0,29; 0,272; 0,0562);$$

$$\lambda_{\text{max}} = 4,672.$$

Согласованность суждения оценивается индексом однородности:

$$UC = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} = \frac{4,672 - 4}{4 - 1} = 0,224.$$

Отношение однородности:

$$OC = \frac{UC}{M(uo)} = \frac{0,224}{0,9} = 0,249.$$

где  $M(uo)$  — среднее значение индекса однородности случайным образом составленной

ТАБЛИЦА 2. Значения индекса однородности

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$M(uo)$	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

матрицы парных сравнений, основанное на экспериментальных данных в соответствии с табл. 2.

На основе иерархического синтеза путем последовательного определения вектора приоритетов альтернатив  $W$ , относительно элементов  $E_{\text{ЛЦ}}$ , находящихся на всех иерархических уровнях проводится в направлении от нижних уровней к верхним с учетом конкретных связей между элементами, принадлежащими различным уровням и определяются весовые значения критериев, таким образом, получены следующие весовые значения критериев:  $T = 0,382$ ;  $K = 0,29$ ;  $C = 0,272$ ;  $A = 0,0562$ .

*Этап 4.* Определение общего веса каждого местоположения ОЛЦ.

По выражению (1) определим общий вес каждого местоположения ОЛЦ:

$$A = 42,344;$$

$$B = 40,416;$$

$$C = 38,082.$$

По усовершенствованному методу центра тяжести с учетом критериев транспортных затрат на переработку, категории, специализации и социальной значимости линии ОЛЦ ( $C$ ) является оптимальным в рассматриваемых условиях.

### Заключение

На основании проведенных исследований размещение опорных логистических центров на пересечении ЛДС и МИЛ целесообразно при оптимизации транспортных затрат и использовании мультимодальных логистических сервисов.

ЛДС могут использоваться для транспортировки больших объемов грузов, в то время как транзитные МИЛ могут использоваться для вариантных маршрутов доставки в условиях проведения ремонтных работ и технологических окон.

Расположение ОЛЦ на пересечении ЛДС и МИЛ позволяет гибко реагировать на изменения спроса в транспортной сфере. Размещение ЛЦ на пересечении ЛДС и МИЛ позволяет обеспечить эффективное функционирование логистических систем и железнодорожной транспортной сети на основе привлечения объемов перевозок на МИЛ.

Разработан инструментарий нахождения наилучшего расположения ОЛЦ на основе критериев транспортных затрат, категории, специализации и социальной значимости железнодорожных линий с использованием усовершенствованного метода центра тяжести решения задачи векторной оптимизации и определения весовых значений критериев на основе метода анализа иерархий.

### Библиографический список

1. Методика классификации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» № 551р от 04.03.2015.
2. Вакуленко С. П., Колин А. В., Евреенова Н. Ю. и др. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий. Монография; под ред. С. П. Вакуленко. Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)). М.: ВИНТИ РАН, 2018. 218 с.
3. Шарапов С. Н., Лялько М. В. Классификация и специализация железнодорожных линий —



основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60.

4. Тербнев Л. В. Малодеятельные железнодорожные линии или неинтенсивная экономика // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 6 (19). С. 20–24.

5. Вакуленко С. П. Высокоскоростная магистраль Санкт-Петербург — Москва: проблемы и перспективы / Вакуленко С. П., Колин А. В. // Железнодорожный транспорт. 2006. № 6. С. 47–51.

6. Ковалев К. Е. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, О. А. Медведь // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 2. С. 150–161. DOI: 10.20295/2412–9186–2022–8–2–150–161.

7. 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.

8. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 402 LNNS. P. 701–709. DOI: 10.1007/978–3–030–96380–4\_76.

9. Kovalev K. E. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742–6596/2131/3/032008.

10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Дата поступления: 30.01.2023

Решение о публикации: 22.02.2024

#### Контактная информация:

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

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — докт. техн. наук, доцент; novichihin@bk.ru

## Improving transport technological processes of the railway network

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

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

**For citation:** Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Improving transport technological processes of the railway network // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 178–186. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-178-186.

#### Abstract

**Purpose:** To increase the efficiency of the railway transport network through the mutually beneficial interaction of lines of various categories. **Methods:** Methods of control theory, system analysis, synthesis and mathematical modeling were used. **Results:** The tools for determining the optimal location of logistics centers using the center of gravity method have been improved by taking into account the criteria for minimizing transport costs, category, specialization and social significance of the line, as well as determining the weight values of the criteria using the hierarchy analysis method. **Practical significance:** The proposed

tools allow you to determine the location of the logistics center at the intersection of intensive and low-intensity railway lines, taking into account the criteria for minimizing transport costs, the specialization of the line and the social significance of the lines for the regions under consideration.

**Keywords:** low-intensity railway lines, intensive lines, center of gravity method, hierarchy analysis method.

## References

1. Metodika klassifikacii zheleznodorozhnyh linij OAO "RZhD", utverzhennaja rasporyazheniem OAO "RZhD" № 551r ot 04.03.2015. (In Russian)
2. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Ju. i dr. Jeffektivnost' jekspluatacii i obsluzhivanija malointensivnyh zheleznodorozhnyh linij. Monografija; pod red. S. P. Vakulenko. Rossijskij universitet transporta (RUT (MIIT)). M.: VINITI RAN, 2018. 218 s. (In Russian)
3. Sharapov S. N., Ljal'ko M. V. Klassifikacija i specializacija zheleznodorozhnyh linij — osnova optimizacii jekspluatacionnyh rashodov // Zheleznodorozhnyj transport. 2016. № 7. S. 50–60. (In Russian)
4. Terebnev L. V. Malodejatel'nye zheleznodorozhnye linii ili neintensivnaja jekonomika // Transport Rossijskoj Federacii. 2008. № 6 (19). S. 20–24. (In Russian)
5. Vakulenko S. P. Vysokoskorostnaja magistral' Sankt-Peterburg — Moskva: problemy i perspektivy / Vakulenko S. P., Kolin A. V. // Zheleznodorozhnyj transport. 2006. № 6. S. 47–51. (In Russian)
6. Kovalev K. E. Razrabotka mehanizmov povysheniya jeffektivnosti funkcionirovaniya malointensivnyh zheleznodorozhnyh linij / K. E. Kovalev, A. V. Novichihin, O. A. Medved' // Avtomatika na transporte. 2022. T. 8. № 2. S. 150–161. DOI: 10.20295/2412–9186–2022–8–2–150–161. (In Russian)
7. Kovalev K. E. Kompleksnyj sinergetiko-indikatornyj podhod k upravleniju processami perevozok na intensivnyh i malodejatel'nyh liniyah / K. E. Kovalev, A. V. Novichihin // Avtomatika na transporte. 2021. T. 7. № 2. S. 252–267. DOI: 10.20295/2412–9186–2021–7–2–252–267. (In Russian)
8. Kovalev K., Novichihin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. T. 402 LNNS. S. 701–709. DOI: 10.1007/978–3–030–96380–4\_76.
9. Kovalev K. E. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichihin // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742–6596/2131/3/032008.
10. Saati T. Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij. M.: Radio i svjaz', 1993. 278 s. (In Russian)

Received: 30.01.2023

Accepted: 22.02.2024

### Author's information:

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering;

kovalev\_kostia@mail.ru

Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering,

Associate Professor; novichihin@bk.ru

УДК 656.222.6

## Методика определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов в границах железной дороги

С. А. Маринин

Нижегородский центр организации работы железнодорожных станций, Россия, 603002, Нижний Новгород, пл. Революции, 5

**Для цитирования:** *Маринин С. А.* Методика определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов в границах железной дороги // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 187–198. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-187-198

### Аннотация

**Цель:** разработать методику оценки суммарных потерь участковой скорости движения грузовых поездов, которая, в отличие от существующих методов, основанных на подсчете потерь, вызванных влиянием отдельных эксплуатационных факторов, будет базироваться на использовании статистических данных и учитывать весь спектр эксплуатационных факторов, оказывающих влияние на выполнение рассматриваемого показателя. **Методы:** формирование статистической базы параметров эксплуатационной работы железной дороги и проведение на ее базе исследования с использованием инструментов теории вероятностей и математической статистики: оценки распределения рассматриваемых величин, корреляционного и регрессионного анализа. **Результаты:** установлено, что 75 % вариабельности участковой скорости движения грузовых поездов объясняется изменением величины рабочего парка грузовых вагонов. На основании этого разработана методика оценки потерь участковой скорости движения грузовых поездов через величину рабочего парка грузовых вагонов на железной дороге. Предложены графический и аналитический способ определения данных потерь. **Практическая значимость:** показано, что разработанная методика, в отличие от существующих, позволяет более точно оценить потери участковой скорости движения грузовых поездов. Ее применение позволяет планировать и анализировать выполнение участковой скорости движения грузовых поездов с учетом складывающейся эксплуатационной работы на железной дороге.

**Ключевые слова:** эксплуатационная работа, участковая скорость, прогнозирование показателей, определение потерь, корреляционный анализ, уравнение регрессии.

### Введение

Участковая скорость движения грузовых поездов, как известно, является одним из основных показателей, характеризующих качество эксплуатационной работы на железной дороге в целом и грузовых перевозок в частности. От выполнения участковой скорости движения грузовых поездов зависит выполнение многих других показателей эксплуатационной работы: сроков доставки грузов, производительности локомотива и т. д. Также

участковая скорость движения грузовых поездов непосредственно оказывает влияние на организацию труда и отдыха локомотивных бригад. Поэтому важно качественно планировать данный показатель, а также анализировать потери в его выполнении.

В настоящее время при оценке потерь участковой скорости движения грузовых поездов используются различные методики, которые сводятся либо к подсчету времени

задержек поездов по отдельным причинам, как, например, реализовано в автоматизированной системе ведения и анализа графика исполненного движения ГИД «Урал-ВНИИЖТ», либо к разработке регрессной модели, учитывающей влияние на участковую скорость различных эксплуатационных факторов [1–3]. В первом случае является затруднительным выявление потерь участковой скорости движения грузовых поездов. Во втором случае, в силу сложности математического описания эксплуатационных процессов, достоверно учесть все факторы, влияющие на результирующий показатель, в данном случае на участковую скорость движения грузовых поездов, затруднительно, так как ряд факторов обладает нелинейным влиянием [4]. К тому же при увеличении количества факторов в регрессной модели увеличивается разница между скорректированным и нескорректированным коэффициентом детерминации [5]. Поэтому была разработана методика, позволяющая оценить потери участковой скорости движения грузовых поездов от всей совокупности причин, приводящих к задержкам поездов.

### Статистический анализ

В исследовании был использован следующий принцип. Задержки грузовых поездов могут вызываться различными причинами: проведением «окон» на инфраструктуре [6], обеспеченностью поездов локомотивами [7, 8], фактическими размерами движения поездов [9], задержками поездов на подходах к техническим станциям [10] и т.д. Все это в конечном счете приводит к увеличению рабочего парка грузовых вагонов на железной дороге. Таким образом, через величину рабочего парка грузовых вагонов можно оценить потери участковой скорости движения

грузовых поездов, вызванные сбоями в эксплуатационной работе.

Для проведения исследования были собраны статистические данные о ежесуточном выполнении участковой скорости движения грузовых поездов и рабочем парке грузовых вагонов на Горьковской железной дороге в период с ноября 2022 года по октябрь 2023 года. Наличие данных за календарный год позволило учесть влияние на выполнение рассматриваемого показателя сезонных факторов.

Вначале для использования в исследовании методов теории вероятностей и математической статистики было рассмотрено, каким законом распределения наилучшим образом описывается полученная статистическая база. Как показывают другие исследования [11, 12], показатели эксплуатационной работы железной дороги достаточно хорошо описываются нормальным законом распределения. Поэтому распределение рассматриваемых параметров: рабочего парка грузовых вагонов и участковой скорости движения грузовых поездов, были рассмотрены на соответствие нормальному закону.

Вначале исходные данные были сгруппированы по интервалам в соответствии с правилом Стерджесса [13]:

$$K = 3,3 \lg N + 1,$$

где  $N$  — объем выборки.

По итогам группировки данных построены гистограммы распределения рассматриваемых параметров. На рис. 1 в качестве примера приведена гистограмма плотности распределения участковой скорости движения грузовых поездов.

Для установления того, соответствуют ли рассматриваемые распределения нормальному закону или нет, была выдвинута нулевая

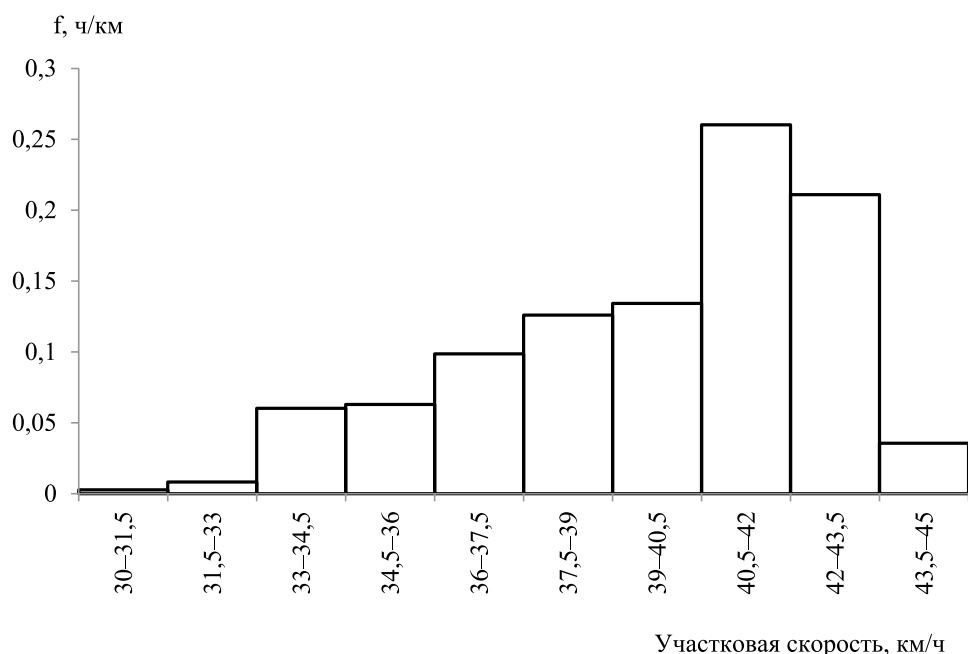


Рис. 1. Гистограмма распределения участковой скорости движения грузовых поездов

гипотеза, заключающаяся в том, что эмпирические и теоретические частоты распределения рассматриваемой величины равны. Альтернативная гипотеза заключается в отличии эмпирических и теоретических частот.

Для проверки гипотезы был использован критерий согласия Колмогорова, который позволяет определить меру расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением. Статистика критерия Колмогорова имеет вид [14]:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x, \theta)|,$$

где  $F_n(x)$  — эмпирическая функция распределения;

$F(x, \theta)$  — теоретическая функция распределения.

На основании меры расхождения определяется величина  $\lambda$  [15]:

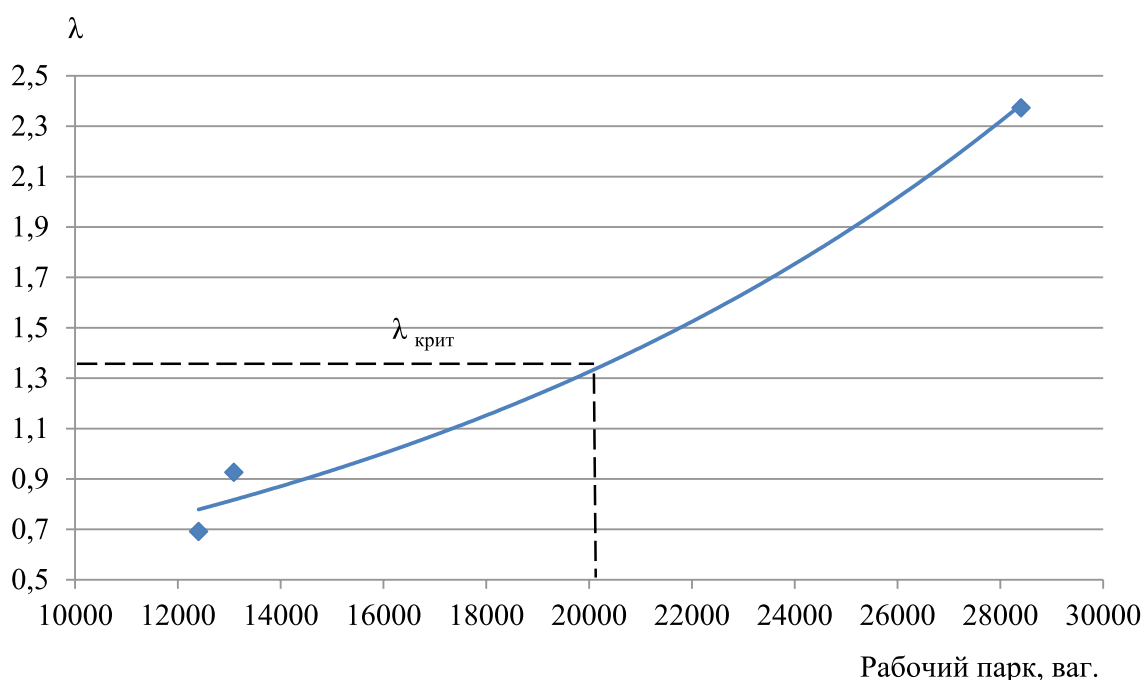
$$\lambda = D\sqrt{n},$$

где  $n$  — объем выборки.

Полученное значение  $\lambda$  сравнивается с критическим  $\lambda_{\alpha}$ . Если вычисленное значение меньше критического, то нулевая гипотеза принимается, если больше — принимается альтернативная гипотеза. В расчетах был принят уровень значимости  $\alpha = 0,05$ .

Выполненные расчеты показали, что хотя полученный критерий Колмогорова больше критического значения, тем не менее распределение рассматриваемых величин близко к нормальному закону.

Поэтому далее для участковой скорости движения грузовых поездов были сформированы частные выборки с периодами: полугодие с ноября по апрель и за три месяца с января по март, что позволило исключить влияние сезонных факторов, таких как летние ремонтно-путевые работы. По каждой полученной выборке рассмотренным выше способом была выполнена проверка на соответствие нормальному закону. В соответствии с результатами расчетов на рис. 2 построена зависимость критерия Колмогорова



**Рис. 2.** Зависимость критерия Колмогорова от диапазона рабочего парка грузовых вагонов в выборке при проверке на соответствие нормальному закону распределения

при проверке распределения на соответствие нормальному закону от диапазона изменения рабочего парка грузовых вагонов в выборке.

Как видно, при уменьшении диапазона изменения рабочего парка грузовых вагонов в выборке критерий Колмогорова уменьшается и распределение участковой скорости движения грузовых поездов приближается к нормальному закону. При достижении диапазона изменения рабочего парка грузовых вагонов не более 20 000 вагонов, критерий Колмогорова становится менее критического значения. Это является следствием того, что уменьшается влияние эксплуатационных факторов на величину рабочего парка, то есть уравниваются условия проведения испытаний.

Таким образом, при фиксированных значениях рабочего парка грузовых вагонов распределение средней участковой скорости

движения грузовых поездов с необходимым уровнем значимости соответствуют нормальному закону, а следовательно, к нему можно применить методы статистического анализа, требующие нормальности распределения рассматриваемой величины.

Таким же образом на соответствие нормальному закону было проверено распределение рабочего парка грузовых вагонов. Результаты показали, что при диапазоне изменения рабочего парка грузовых вагонов не более 17 000 вагонов, его распределение с необходимым уровнем значимости соответствует нормальному закону.

Поэтому дальше был осуществлен переход от исходной общей выборки к отдельным частным выборкам, в которых каждый рассматриваемый параметр в большей степени приближен к нормальному распределению.

### Разработка методики

Для установления степени взаимосвязи участковой скорости движения грузовых поездов с рабочим парком грузовых вагонов был выполнен корреляционный анализ.

Вначале были определены парные коэффициенты корреляции между рассматриваемыми величинами [16]:

$$r_{xy} = \frac{M\{[X - M(X)][Y - M(Y)]\}}{\sqrt{M(X^2) - [M(X)]^2} \sqrt{M(Y^2) - [M(Y)]^2}},$$

где  $M$  — математическое ожидание исследуемой величины;

$X$  — входная переменная;

$Y$  — выходная переменная.

После этого была выполнена проверка их значимости с использованием Т-критерия [17]:

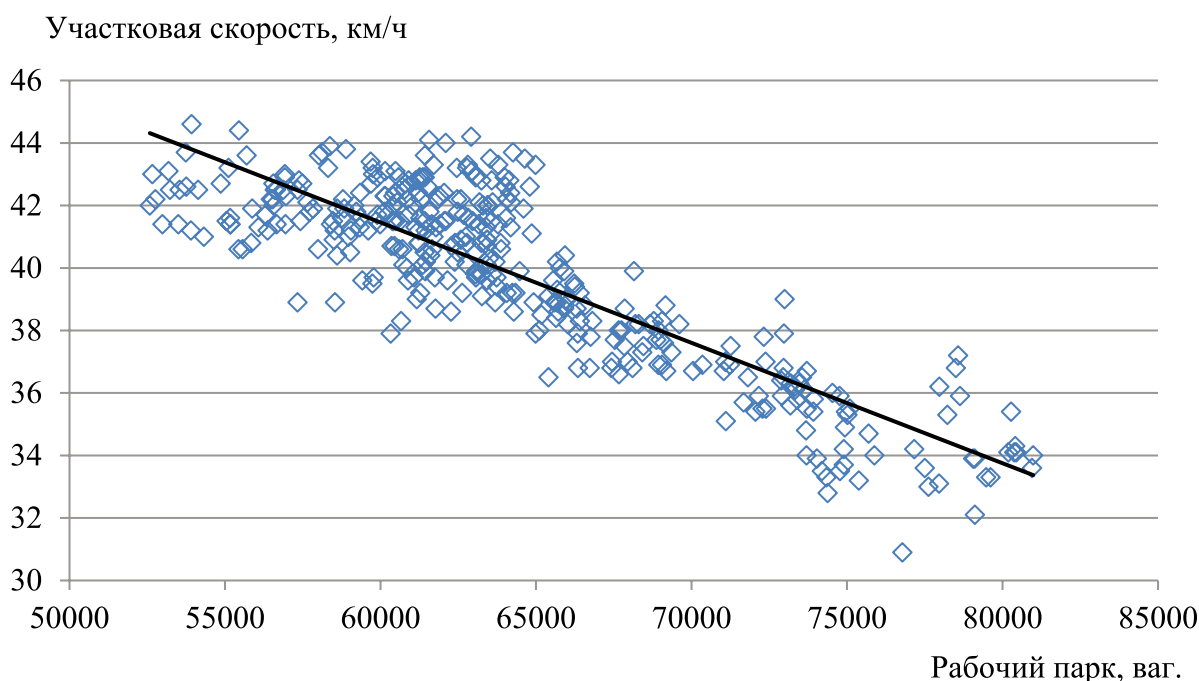
$$T = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}},$$

где  $r_{xy}$  — коэффициент корреляции;

$n$  — объем выборки.

Результаты расчетов показали, что коэффициент корреляции составил  $-0,87$ . Т-критерий составил  $33,0$  при критическом значении  $1,96$ . Таким образом, подтверждена значимость полученного коэффициента корреляции, а его значение говорит о достаточно тесной взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами. Знак минус говорит о том, что связь отрицательная, то есть при увеличении рабочего парка грузовых вагонов участковая скорость движения грузовых поездов уменьшается.

На рис. 3 показана диаграмма рассеяния, характеризующая зависимость фактической участковой скорости движения грузовых поездов от рабочего парка грузовых вагонов.



**Рис. 3.** Зависимость участковой скорости движения грузовых поездов от рабочего парка грузовых вагонов

Как показывает линия тренда, имеет место линейная зависимость. Диапазон изменения участковой скорости движения грузовых поездов при минимальном и максимальном рабочем парке грузовых вагонов на железной дороге составляет 11 км/ч.

Продление линии тренда за полученные границы недопустимо, так как при больших и меньших значениях рабочего парка грузовых вагонов зависимость будет искажаться, то есть не будет линейной. Это обусловлено тем, что при определенном малом значении рабочего парка грузовых вагонов будет достигнуто максимально возможное значение участковой скорости движения грузовых поездов и дальнейшее снижение рабочего парка грузовых вагонов не будет приводить к ее увеличению. При увеличении рабочего парка грузовых вагонов наступит «насыщение» инфраструктуры и зависимость участковой скорости движения грузовых поездов может стать нелинейной.

Для математической оценки влияния рабочего парка грузовых вагонов на участковую скорость движения грузовых поездов было сформировано уравнение регрессии, которое в общем виде выглядит как [18]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_n \cdot x_n,$$

где  $b$  — коэффициенты регрессии;

$x$  — факторы, влияющие на переменную.

По итогам вычислений получено уравнение регрессии для определения участковой скорости движения грузовых поездов в рассмотренном диапазоне изменения рабочего парка грузовых вагонов:

$$A = 64,572 - 0,0004 \cdot t,$$

где  $t$  — рабочий парк грузовых вагонов.

Также был вычислен коэффициент детерминации, определяемый как квадрат коэффициента корреляции [5]. Он составил 0,75. Иными словами, 75 % варибельности участковой скорости движения грузовых поездов объясняется значением рабочего парка грузовых вагонов на железной дороге.

Далее была определена разница между участковой скоростью движения грузовых поездов при минимальном значении рабочего парка грузовых вагонов и участковой скоростью движения грузовых поездов, заложенной в нормативном графике движения грузовых поездов. Она составила 4 км/ч. Таким образом, это является величиной потерь участковой скорости при минимальном наличии рабочего парка грузовых вагонов на железной дороге. Для получения суммарных потерь участковой скорости движения грузовых поездов при различных значениях рабочего парка грузовых вагонов необходимо полученную константу сложить с величиной потерь участковой скорости движения грузовых поездов, определенной как разница участковой скорости движения грузовых поездов при текущем и минимальном значениях рабочего парка грузовых вагонов.

#### Апробация полученных результатов

На рис. 4 приведены помесечные значения потерь участковой скорости движения грузовых поездов, вычисленные в программном комплексе АС ПУСК и по разработанной методике. Если к величине потерь участковой скорости движения грузовых поездов, определенной в АС ПУСК, прибавить значение фактической участковой скорости движения грузовых поездов, то получится значение больше заложенного в нормативном графике движения грузовых поездов в среднем



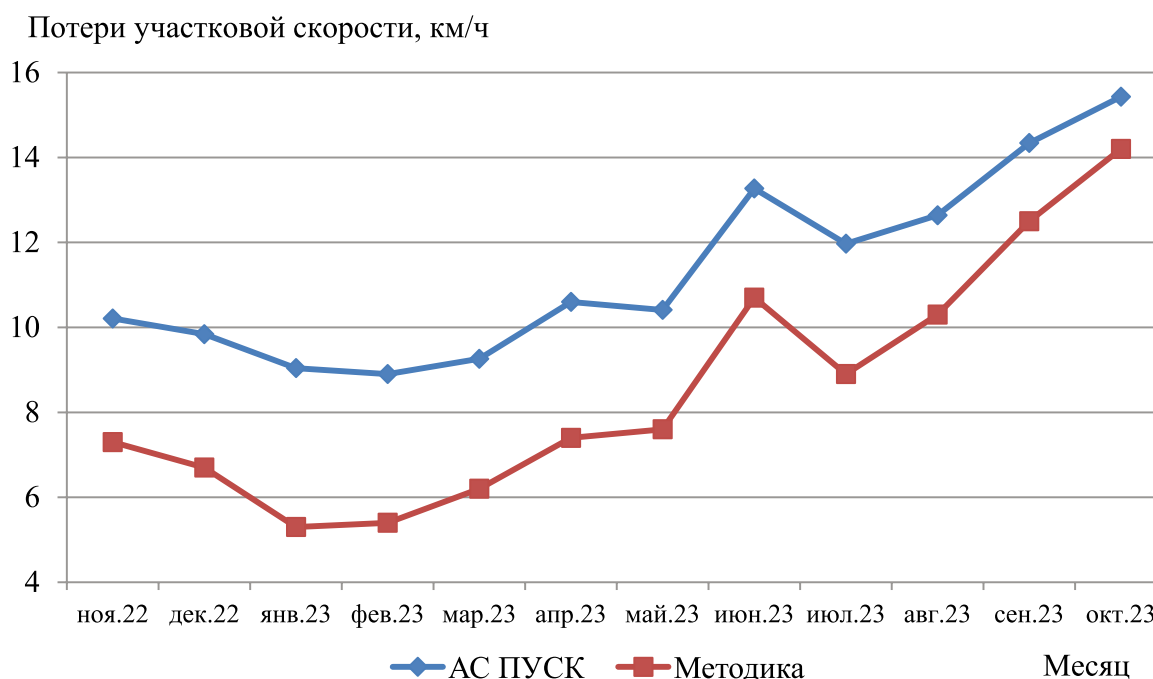


Рис. 4. Результаты определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов

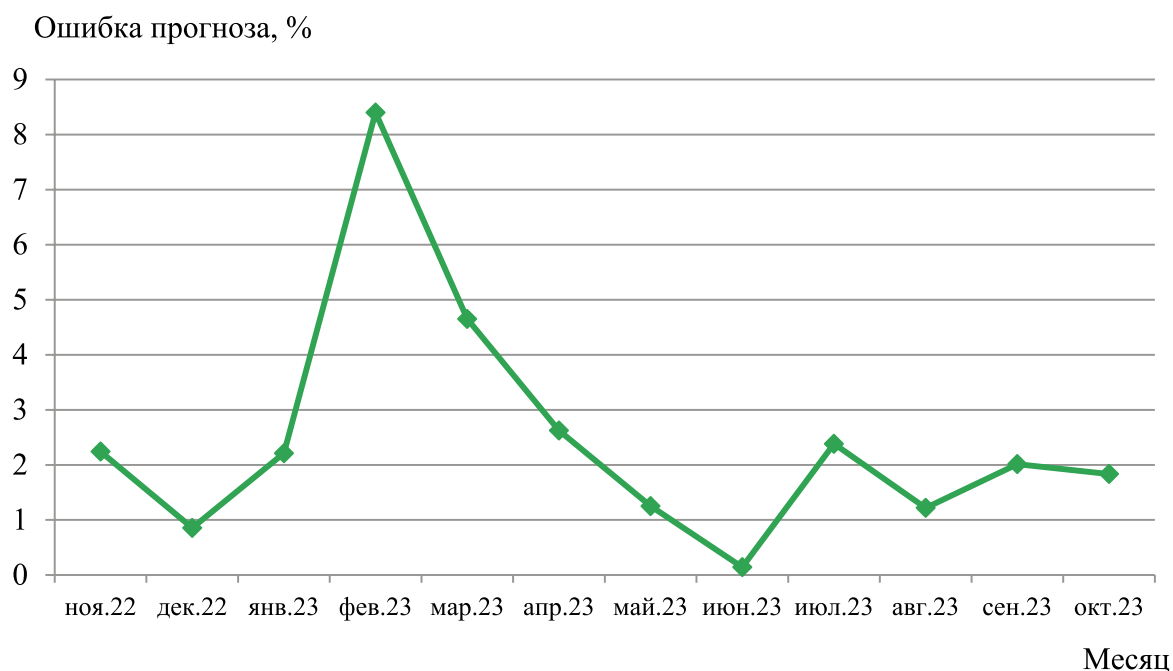
на 3 км/ч, что в реальных условиях является недостижимым.

Таким образом, потери участковой скорости движения грузовых поездов, вычисленные по разработанной методике, более близки к реальному значению разницы между фактической участковой скоростью движения грузовых поездов и максимально возможной.

Для оценки точности прогнозирования участковой скорости движения грузовых поездов с использованием разработанной методики было спрогнозировано ежемесячное ее выполнение в рассматриваемом периоде. Полученные значения сравнили с фактически реализованной участковой скоростью движения грузовых поездов. Результаты приведены на рис. 5.

Средняя погрешность прогнозирования составила 2,5 %. При этом аномальные отклонения в прогнозе имеют место в февраль

и марте 2023 года, что стало следствием массового прибытия под выгрузку вагонов с грузом для строительства автомагистрали М-12. Наличие вагонов с местным грузом в феврале и марте было значительно выше остальных месяцев. Выгрузка также была выше. Таким образом, увеличение рабочего парка грузовых вагонов в указанные месяцы стало следствием увеличения рабочего парка местных вагонов. Препятствий для пропуска транзитного вагонопотока не было, а количество отставленных от движения грузовых поездов находилось на минимальном значении. Такие уникальные параметры эксплуатационной работы, не повторяющиеся в другие временные периоды, привели к увеличению отклонения прогноза от фактического значения участковой скорости движения грузовых поездов. При исключении двух аномальных месяцев средняя ошибка прогнозирования составит 1,7 %.



**Рис. 5.** Ошибка при прогнозировании участковой скорости движения грузовых поездов

Дополнительно была проверена корреляционная связь между участковой скоростью движения грузовых поездов и рабочим парком грузовых вагонов в выборке без аномальных месяцев. Коэффициент корреляции увеличился до  $-0,9$ , а коэффициент детерминации до  $0,81$ . Таким образом, без учета уникальных отклонений в параметрах эксплуатационной работы  $81\%$  вариабельности участковой скорости движения грузовых поездов объясняется изменением величины рабочего парка грузовых вагонов.

#### Алгоритм определения потерь участковой скорости

В соответствии с выполненными расчетами на рис. 6 приведен пошаговый алгоритм определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов в зависимости от величины рабочего парка грузовых вагонов.

Определить потери участковой скорости возможно двумя путями. Во-первых, графическим методом по линии тренда с использованием зависимости, построенной на рис. 3. Во-вторых, аналитическим методом путем подстановки величин рабочего парка грузовых вагонов в уравнение регрессии.

#### Выводы

1. Разработанная методика позволяет на основании статистических данных определить суммарные потери участковой скорости движения грузовых поездов в зависимости от величины рабочего парка грузовых вагонов на железной дороге.

2. При планировании участковой скорости движения грузовых поездов на предстоящий период необходимо учитывать потери, вызываемые увеличением рабочего парка грузовых вагонов.

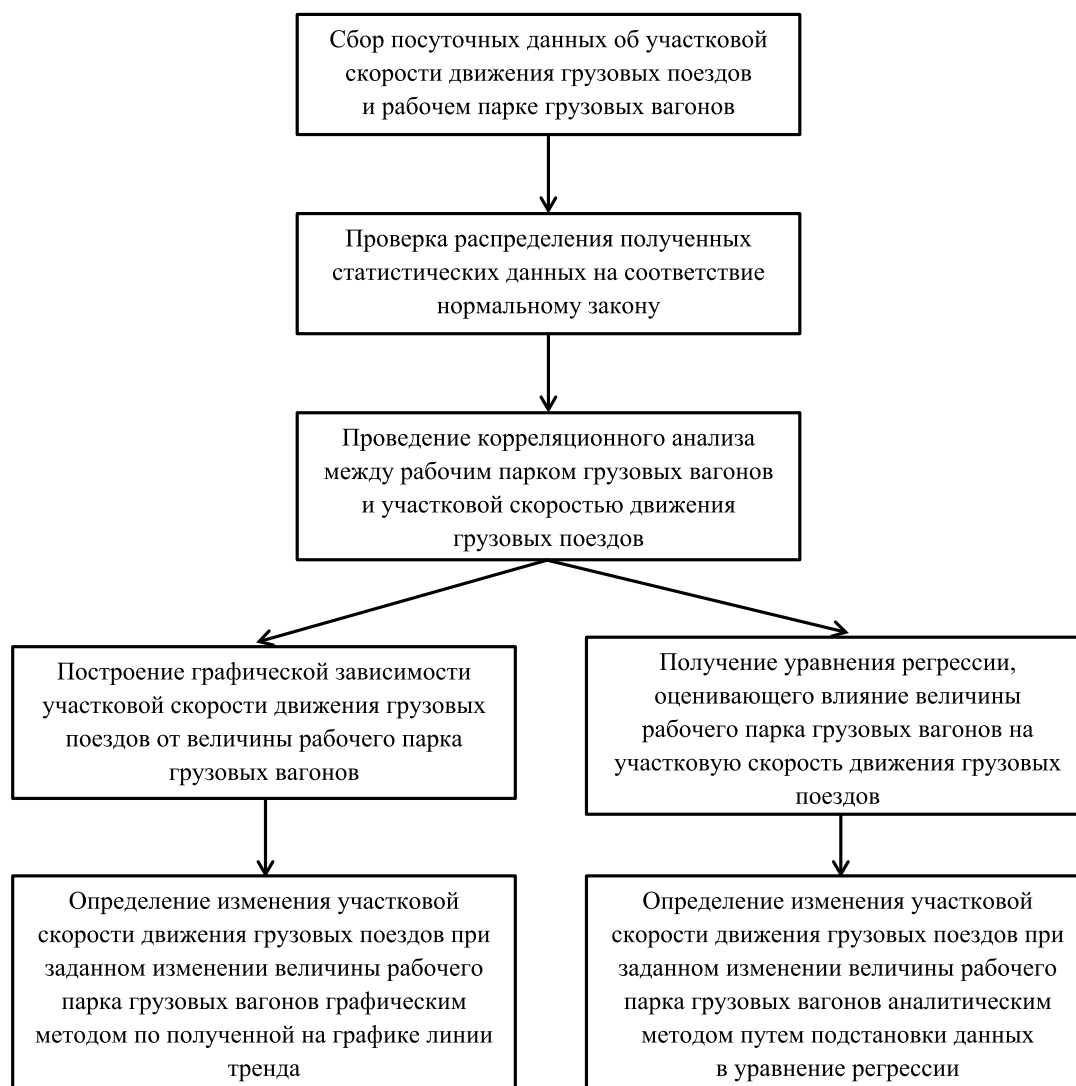


Рис. 6. Алгоритм определения потерь участковой скорости движения грузовых поездов

### Библиографический список

1. Котенко А. Г. Определение участковой скорости на основе стохастического моделирования параметра, описывающего влияние задержек поездов / А. Г. Котенко, О. В. Котенко, А. В. Гоголева // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 4 (29). С. 113–120. ISSN 1815-588X.
2. Апатцев В. И. Оценка факторов риска реализации технологии движения грузовых поездов по расписанию на показатель средней участковой скорости / В. И. Апатцев, Г. М. Биленко, А. М. Орлов // Наука и техника транспорта. 2014. № 1. С. 8–16. ISSN 2074-9325.
3. Буцацкая В. В. Прогнозирование средней участковой скорости движения поездов на основе многофакторной регрессионной модели / В. В. Буцацкая, А. В. Гоголева // Вестник АГУ. 2017. № 4 (211). С. 181–186. ISSN 2410-3225.
4. Виноградов С. А. Влияние условий пропуска поездопотока на величину эксплуатируемого парка локомотивов: спец. 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрифика-

ция»: дис. ... канд. техн. наук. М.: Государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», 2002.

5. Елисеева И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. М.: Финансы и статистика, 2004. 656 с. ISBN 5-279-02414-7.

6. Маринин С. А. Влияние окон для ремонтных и строительно-монтажных работ на участковую скорость движения грузовых поездов // Инновационный транспорт. 2017. № 2. С. 55–58. ISSN 2311-164X.

7. Корниенко Н. В. Зависимость участковой скорости от обеспеченности транзитных поездов локомотивами // Железная дорога: путь в будущее: Сборник трудов I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых. М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. 2022. С. 315–321.

8. Корниенко Н. В. Фактор обеспечения поездов локомотивами на станциях стыкования родов тока и его влияние на участковую скорость // Сборник материалов II международной конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ»: загляни за горизонт. М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. 2023. С. 124–129.

9. Мехедов М. И. Методика оценки факторов, определяющих стабильность пропуска грузовых поездопотоков на грузонапряженных направлениях: спец. 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: дис. ... канд. техн. наук. М.: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», 2016.

10. Сайбаталов Р. Ф. Методы устранения затруднений в работе полигонов железнодорожной сети: спец. 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2020.

11. Маринин С. А. Определение эксплуатационных факторов, влияющих на средний вес грузового поезда // Инновационный транспорт. 2019. № 2. С. 56–61. ISSN 2311–164X.

12. Маринин С. А. Прогнозирование показателя эксплуатационной работы железных дорог «средний вес грузового поезда» // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2021. № 2. С. 17–22. ISSN 0236-1914.

13. Sturges H. The choice of a class-interval // Journal of the American Statistical Association. 1926. № 21. С. 65–66.

14. Орлов А. И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97. С. 31–45. ISSN 1990-4665.

15. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с. ISBN 5-238-00573-3.

16. Куликов Е. И. Прикладной статистический анализ. М.: Горячая линия — Телеком, 2008. 464 с. ISBN 978-5-9912-0021-9.

17. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 479 с. ISBN 5–06–004214–6.

18. Rohadgi V.K. An introduction to probability and statistics / V. K. Rohadgi, A. K. Md. Ehsanes. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 700 p. ISBN 978-1-118-79964-2.

Дата поступления: 15.11.2023

Решение о публикации: 05.02.2024

#### **Контактная информация:**

МАРИНИН Сергей Александрович — канд. техн. наук; marininsergey.nn@mail.ru

## Methodology for determining local speed losses of freight trains within the boundaries of the railway

**S. A. Marinin**

Nizhny Novgorod center for organizing the work of railway stations, 5, pl. Revolutions, Nizhny Novgorod, 603002, Russia

**For citation:** *Marinin S. A.* Methodology for determining local speed losses of freight trains within the boundaries of the railway // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 187–198. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-187-198

### Abstract

**Purpose:** to develop a methodology for estimating the total losses of the local speed of freight trains, which, unlike existing methods based on calculating losses caused by the influence of individual operational factors, will be based on the use of statistical data, and take into account the entire range of operational factors that influence the implementation of the indicator under consideration. **Methods:** formation of a statistical database of railway operational parameters and conducting research on its basis using the tools of probability theory and mathematical statistics: assessing the distribution of the quantities under consideration, correlation and regression analysis. **Results:** it was established that 75 % of the variability in the local speed of freight trains is explained by changes in the size of the operating fleet of freight cars. Based on this, a methodology has been developed for estimating losses in the local speed of freight trains through the size of the working fleet of freight cars on the railway. A graphical and analytical method for determining these losses is proposed. **Practical significance:** it is shown that the developed methodology, in contrast to existing ones, makes it possible to more accurately estimate the loss of local speed of freight trains. Its use makes it possible to plan and analyze the implementation of the local speed of freight trains, taking into account the evolving operational work on the railway.

**Keywords:** operational work, local speed, forecasting indicators, determining losses, correlation analysis, regression equation.

### References

1. Kotenko A. G. Opredelenie uchastkovoj skorosti na osnove stohasticheskogo modelirovanija parametra, opisuvajushhego vlijanie zaderzhek poezdov / A. G. Kotenko, O. V. Kotenko, A. V. Gogoleva // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. 2011. № 4 (29). S. 113–120. ISSN 1815-588X. (In Russian)
2. Apatcev V. I. Ocenka faktorov riska realizacii tehnologii dvizhenija gruzovyh poezdov po raspisaniju na pokazatel' srednej uchastkovoj skorosti / V. I. Apatcev, G. M. Bilenko, A. M. Orlov // Nauka i tehnika transporta. 2014. № 1. S. 8–16. ISSN 2074-9325. (In Russian)
3. Buchackaja V. V. Prognozirovanie srednej uchastkovoj skorosti dvizhenija poezdov na osnove mnogofaktornoj regressionnoj modeli / V. V. Buchackaja, A. V. Gogoleva // Vestnik AGU. 2017. № 4 (211). S. 181–186. ISSN 2410-3225. (In Russian)
4. Vinogradov S. A. Vlijanie uslovij propuska poezdopotoka na velichinu jekspluatiruemogo parka lokomotivov: spec. 05.22.07 "Podvizhnoj sostav zheleznyh dorog, tjaga poezdov i jelektrifikacija": dis. ... kand. tehn. nauk. M.: Gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatje "Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut zheleznodorozhnogo transporta", 2002. (In Russian)
5. Eliseeva I. I. Obshhaja teorija statistiki / I. I. Eliseeva, M. M. Juzbashev. M.: Finansy i statistika, 2004. 656 s. ISBN 5-279-02414-7. (In Russian)
6. Marinin S. A. Vlijanie okon dlja remontnyh i stroitel'no-montazhnyh rabot na uchastkovuju

skorost' dvizhenija gruzovyh poezdov // Innovacionnyj transport. 2017. № 2. S. 55–58. ISSN 2311-164X. (In Russian)

7. Kornienko N. V. Zavisimost' uchastkovoju skorosti ot obespechennosti tranzitnyh poezdov lokomotivami // Zheleznaja doroga: put' v budushhee: Sbornik trudov I Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii aspirantov i molodyh uchenyh. M.: Nauchno-issledovatel'skij institut zheleznodorozhnogo transporta. 2022. S. 315–321. (In Russian)

8. Kornienko N. V. Faktor obespechenija poezdov lokomotivami na stancijah stykovanija rodov toka i ego vlijanie na uchastkovuju skorost' // Sbornik materialov II mezhdunarodnoj konferencii "Nauka 1520 VNIIZhT": zagljani za gorizont. M.: Nauchno-issledovatel'skij institut zheleznodorozhnogo transporta. 2023. S. 124–129. (In Russian)

9. Mehedov M. I. Metodika ocenki faktorov, opredelajushhijh stabil'nost' propuska gruzovyh poezdopotokov na gruzonaprjazhennyh napravlenijah: spec. 05.22.08 "Upravlenie processami perevozok": dis. ... kand. tehn. nauk. M.: Akcionerное obshhestvo "Nauchno-issledovatel'skij institut zheleznodorozhnogo transporta", 2016. (In Russian)

10. Sajbatalov R. F. Metody ustraneniya zatrudnenij v rabote poligonov zheleznodorozhnoj seti: spec. 05.22.08 "Upravlenie processami perevozok": dis. ... kand. tehn. nauk. Ekaterinburg: Ural'skij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2020. (In Russian)

11. Marinin S. A. Opredelenie jekspluacionnyh faktorov, vlijajushhijh na srednij ves gruzovogo poezda // Innovacionnyj transport. 2019. № 2. S. 56–61. ISSN 2311-164X. (In Russian)

12. Marinin S. A. Prognozirovanie pokazatelja jekspluacionnoj raboty zheleznih dorog "srednij ves gruzovogo poezda" // Transport: nauka, tehnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik. 2021. № 2. S. 17–22. ISSN 0236-1914. (In Russian)

13. Sturges H. The choice of a class-interval // Journal of the American Statistical Association. 1926. № 21. P. 65–66.

14. Orlov A. I. Neparаметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97. S. 31–45. ISSN 1990-4665. (In Russian)

15. Kremer N. Sh. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika. M.: JuNITI-DANA, 2004. 573 s. ISBN 5-238-00573-3. (In Russian)

16. Kulikov E. I. Prikladnoj statisticheskij analiz. M.: Gorjachaja linija — Telekom, 2008. 464 s. ISBN 978-5-9912-0021-9. (In Russian)

17. Gmurman V. E. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika. M.: Vysshaja shkola, 2004. 479 s. ISBN 5-06-004214-6. (In Russian)

18. Rohadgi V. K. An introduction to probability and statistics / V. K. Rohadgi, A. K. Md. Ehsanes. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 700 p. ISBN 978-1-118-79964-2.

Received: 15.11.2023

Accepted: 05.02.2024

**Author's information:**

Sergey A. MARININ — PhD in Engineering;  
marininsergey.nn@mail.ru

УДК 646.21

## Построение краткосрочного прогноза количества вагонов на станции и путях необщего пользования

**В. А. Ламехов, Е. К. Коровяковский**

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

**Для цитирования:** Ламехов В. А., Коровяковский Е. К. Построение краткосрочного прогноза количества вагонов на станции и путях необщего пользования // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 199–216. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-199-216

### Аннотация

**Цель:** провести анализ исходных данных, определить пропуски и выбросы в данных, разделить данные на временные интервалы, вычислить коэффициенты корреляции, частичной автокорреляции, кросс-корреляции, проанализировать тренд и сезонность полученных временных рядов. Используя авторегрессионные модели, модели машинного обучения, нейронечеткие модели, построить прогнозы временного ряда и определить качество полученных прогнозов. **Методы:** плотность точек, автокорреляция, частичная автокорреляция, кросс-корреляция, тест Фостера — Стюарта, тест Дикки — Фуллера, ARMA, SARMA, MLP, Encoder-Decoder LSTM, TSK, Fuzzy-Partitions, SCRG, Transformers. **Результаты:** получены оценки точности прогнозов выбранных моделей, сопоставлены результаты работы прогнозных моделей обученных на разных выборках исходных данных. Сделаны выводы об эффективности использования исследуемых прогнозных моделей. **Практическая значимость:** исследована способность выбранных моделей к построению краткосрочных прогнозов количества вагонов на станции, проанализированы факторы, влияющие на точность получаемых прогнозов.

**Ключевые слова:** нечеткие нейронные сети, нейронные сети, авторегрессионные модели, анализ работы станции, прогнозирование.

### Введение

Наличие отклонений технологического времени совершения операций с вагонами на объектах железнодорожного транспорта, примыкающих к железнодорожным станциям, от нормативного, предусмотренного в Инструкции о порядке обслуживания и организации движения на железнодорожном пути необщего пользования (Инструкция) или Единым технологическим процессом (ЕТП), делает невозможным использование данного нормативного времени для построения точных прогнозов работы исследуемых объектов. Решением данной проблемы могут

выступать различные прогнозные модели, использующие временные ряды. Потребность в построении прогнозных моделей на железнодорожном транспорте рассмотрена в работе [1].

В данной работе рассматривается использование статистических методов, методов машинного обучения, с использованием нейронных сетей различных архитектур, в том числе нечеткие нейронные сети. Программное обеспечение, использованное для построения нечетких нейронных сетей и их адаптации для прогнозирования временных рядов на

железнодорожном транспорте, приведено в [2]. Использование алгоритмов нечеткой математики приведено в работах [3, 4].

Периодичность сбора данных, точность внесенной информации в информационные системы ОАО «РЖД», специфика работы станций и путей необщего пользования (ПНОП) требует специальной предобработки данных для использования в прогнозных моделях.

### Характеристика полученных исходных данных

В данном разделе рассматриваются исходные данные, полученные из системы «Автоматизированное рабочее место анализа отчетных и пономерных данных» (АРМ ОНД) ОАО «РЖД».

Для использования получаемых исходных данных, собираемых с использованием системы АРМ ОНД ОАО «РЖД», необходимо провести их предобработку. Предобработка исходных данных разделена на несколько этапов:

1. Приведение исходных данных к дискретным временным рядам методом накопления. На данном этапе решается задача определения интервала наблюдения величин. Так как для оценки взаимосвязи значений временных рядов используется коэффициент корреляции или автокорреляции, основанный на коэффициенте корреляции Пирсона, то для получения несмещенной и эффективной оценки коэффициента корреляции выборка должна быть распределена нормально.
2. Анализ полученных временных рядов на наличие выбросов. На данном этапе анализируются полученные временные ряды. Используя группу предложенных

методов: метод поиска выбросов, основанный на алгоритме плотности точек, и метод скользящего среднего, определяются и заполняются обнаруженные в полученных временных рядах выбросы.

3. Анализ коэффициентов автокорреляции выбранных интервалов временных рядов. Для определения возможности прогнозирования одномерных временных рядов определяются коэффициенты автокорреляции и частичной автокорреляции, а также выделяются их значимые компоненты для выбранных интервалов разбиения исходных временных рядов.
4. Анализ наличия тренда и сезонности в рассматриваемых временных рядах. Используя статистические тесты Фостера – Стюарта и Дикки – Фуллера, анализируется наличие трендовых составляющих в среднем и дисперсии рассматриваемых временных рядов, временные ряды проверяются на стационарность.

Для построения прогнозных моделей была собрана повагонная информация о работе грузовой станции Октябрьской железной дороги с примыкающим ПНОП с рабочим парком превышающим 400 вагонов в сутки. Данный ПНОП характеризуется преобладанием погрузки над выгрузкой вагонов и коэффициентом сдвоенных операций близким к единице.

В табл. 1 приведена часть посуточных данных о работе станции, полученных из АРМ ОНД. Данные собраны за период с 16.07.2022 по 16.10.2023.

Исследуемых исходных данных достаточно для того, чтобы составить равноотстоящие интервальные временные ряды прибытия,



ТАБЛИЦА 1. Посуточные показатели работы станции

Дата	Грузовые транзитные без переработки	Грузовые транзитные с переработкой	Местные	Погрузка, тонны	Погрузка, вагоны	Выгрузка, вагоны	Всего занято при грузовых операциях	Всего освобождено вагонов при грузовых операциях
16.07.2022	0	44	435	31422	444	22	444	22
17.07.2022	0	14	494	31275	444	55	444	55
18.07.2022	...	...	...	...	...	...	...	...

отправления, подачи, уборки и погрузки вагонов на станции. Необходимость приведения исходных данных к формату временных рядов с точки зрения прогнозирования будущих значений прибытия, отправления, подачи, уборки и погрузки вагонов обусловлена малой значимостью большинства параметров исходных данных, схожестью значений временных параметров исследуемых исходных данных, а также наличием аномальных значений в исходных данных.

В табл. 2, 3 и 4 приведены обезличенные данные об операциях и времени операций, производимых с каждым вагоном на станции и ПНОП, на основании которых строятся временные ряды для их последующей обработки и использования в прогнозных моделях.

На рис. 1 приведены графики наличия местных вагонов на станции, прибытия, отправления, погрузки вагонов. Значения, представленные на графиках временных рядов, получены для первого временного ряда из посуточных показателей работы станции, представленных в табл. 1; для последующих временных рядов — путем группировки значений исходных данных по 24-часовым интервалам.

В графиках, полученных путем группирования по интервалам, наблюдаются выбросы. В ноябре и декабре 2022 года, мае 2023 года отсутствуют данные для нескольких последовательных значений временного ряда. Отсутствующие данные о прибытии вагонов влияют на снижение значений погрузки вагонов на ноябрь 2022 года для временного ряда погрузки вагонов.

На рис. 2 приведено сопоставление временных рядов местных вагонов на станции и погрузки вагонов. На данном рисунке отчетливо видны отклонения значений временных рядов.

Помимо указанных выше выбросов, в исходных данных наблюдаются значения параметров, которые не могут быть объяснены технологией работы ПНОП, указанной в Инструкции. Так, например, в табл. 5 приведены данные о времени погрузки вагонов на ПНОП, которые совпадают для множества последовательно погруженных вагонов.

В исследуемых повагонных данных также наблюдаются значения-дубликаты.

Для полученных исходных данных невозможно восстановить точное время погрузки и выгрузки вагонов на ПНОП.

ТАБЛИЦА 2. Данные о нахождении вагонов на станции

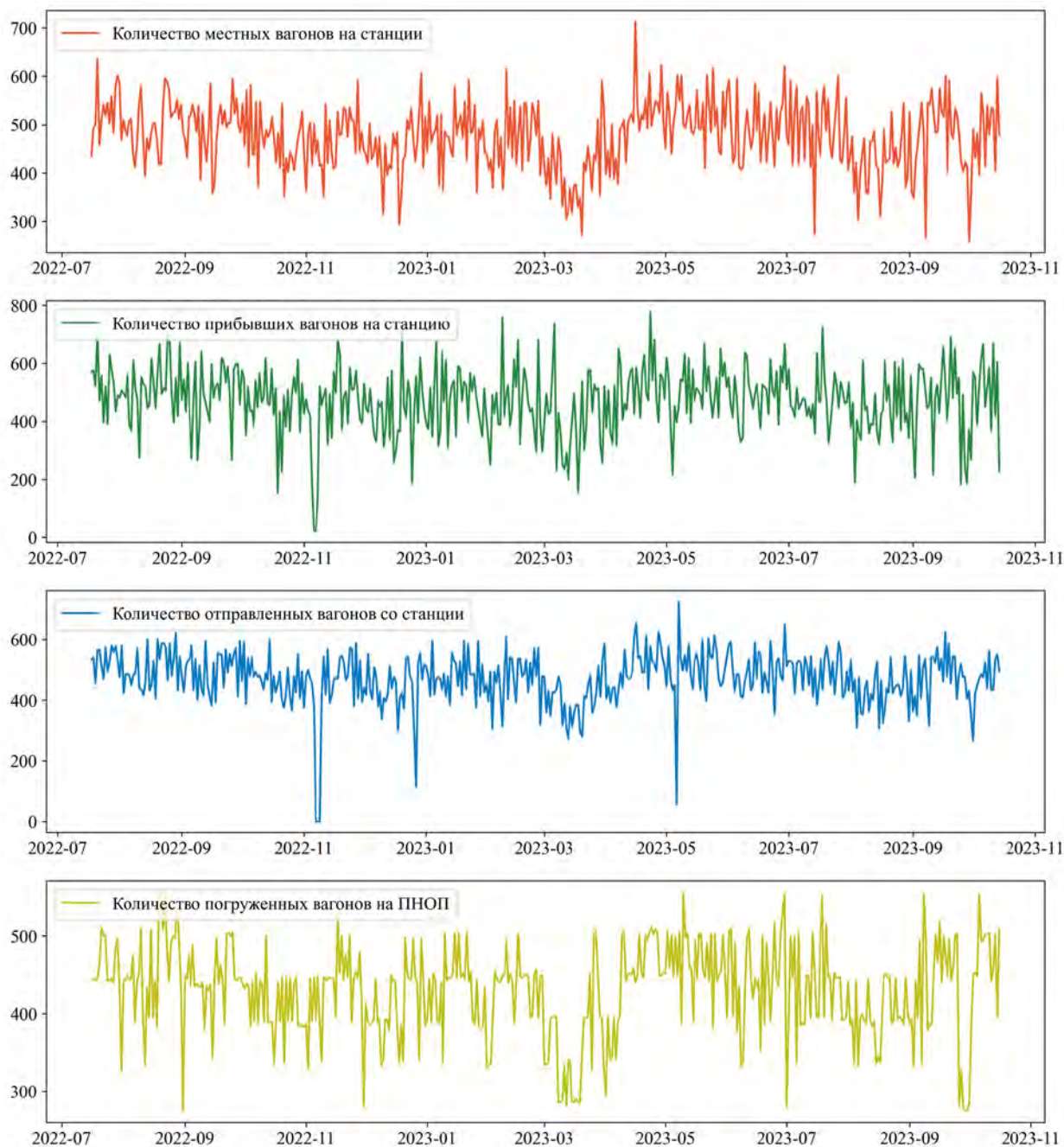
Номер вагона	Дата и время начала простоя	Простой вагонов, всего	Дата и время окончания простоя	На ПНОП, на ответственности ОАО «РЖД»	На ПНОП, на ответственности собственника	На ПНОП, в отстое	Дата и время начала простоя на ПНОП	Простой вагона на ПНОП	Дата и время окончания простоя на ПНОП	На ПНОП, на ответственности ОАО «РЖД»	На ПНОП, на ответственности грузоотправителя
5#####	16.07 15:20	34,85	18.07 2:11	23,26	0,00	0,00	16.07 18:05	11,58	17.07 5:40	0,01	11,56
5#####	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

ТАБЛИЦА 3. Данные о погрузке вагонов

Номер вагона	Груз	Администрация собственника	Род вагона	Тип парка	Местный/ транзитный	Дата грузовой операции	Масса груза, кг	Станция назначения вагона	Код грузоотправителя	Код грузополучателя
5#####	РУДА ЖЕЛЕЗНАЯ	РЖД	ПВ	собственный	транзитный	18.07 4:52	70600	КОШТА	###	###
5#####	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

ТАБЛИЦА 4. Данные о выгрузке вагонов

Номер вагона	Груз	Администрация собственника	Род вагона	Тип парка	Местный/ транзитный	Дата грузовой операции	Масса груза, кг	Станция назначения вагона	Код грузоотправителя	Код грузополучателя
5#####	НЕФТЬ	РЖД	ЦС	собственный	местный	18.07 2:04	58300	####	####	####
5#####	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...



**Рис. 1.** Временные ряды наличия местных вагонов, прибытия, отправления, погрузки вагонов

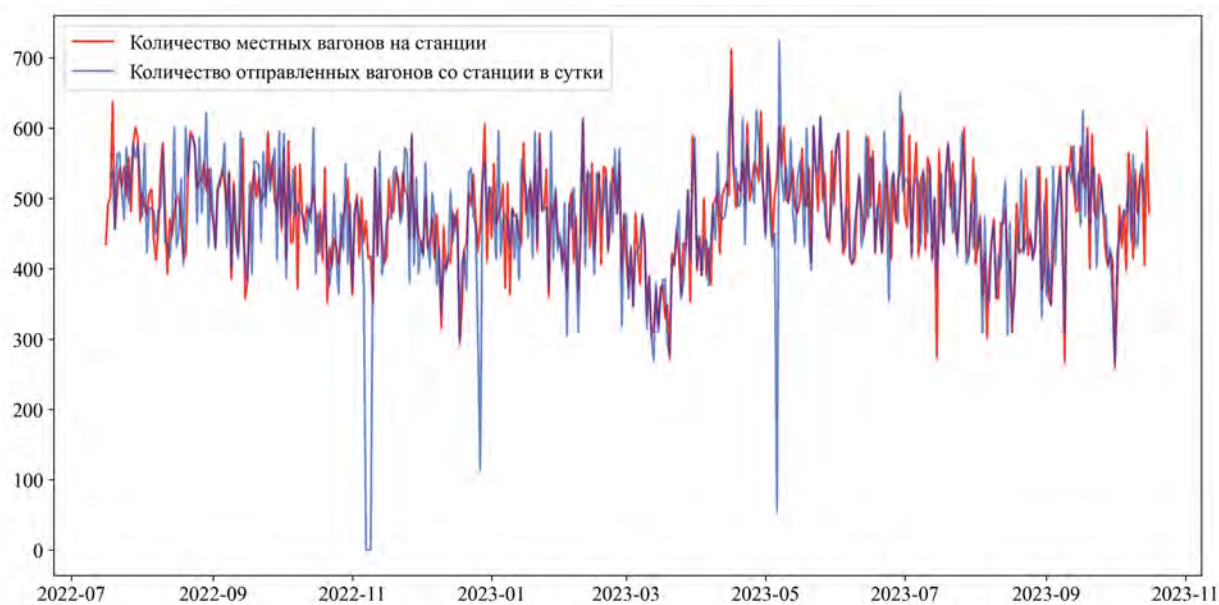


Рис. 2. Временные ряды наличия местных вагонов и отправления вагонов

ТАБЛИЦА 5. Данные о времени погрузки вагонов на ПНОП

Номер вагона	Дата грузовой операции	Масса груза, кг	Номер вагона	Дата грузовой операции	Масса груза, кг	Номер вагона	Дата грузовой операции	Масса груза, кг
5#####	18.07.22 15:10	74400	5#####	18.07.22 15:10	69100	5#####	18.07.22 15:11	76500
6#####	18.07.22 15:10	74400	5#####	18.07.22 15:10	69100	6#####	18.07.22 15:11	76600
5#####	18.07.22 15:10	74700	5#####	18.07.22 15:10	69600	5#####	18.07.22 15:11	76700

### Предобработка полученных исходных данных

В данном разделе описаны анализ и предобработка полученных исходных данных, наличие особенностей в исходных данных, препятствующих использованию всего набора данных для построения прогнозов.

Для получения как можно большего количества исходных данных временного ряда подбирается размер интервала, на котором будут группироваться повагонные исходные данные. Интервал подбирается таким образом, чтобы

распределение случайной величины соответствовало нормальному закону распределения. Для оценки наиболее значимых компонент временных рядов, количества ретроспективных данных, подаваемых в модель для построения прогноза, используется коэффициент автокорреляции и частичной автокорреляции. Так как данные коэффициенты основаны на коэффициенте корреляции Пирсона, то для получения несмещенной и эффективной оценки коэффициента корреляции выборка должна быть распределена нормально.

На рис. 3 приведены гистограммы распределения значений получаемой случайной величины в зависимости от интервала разбиения исходных данных.

Как видно из гистограмм, наиболее приближенные к нормальному закону распределения значения случайной величины получены при значении интервала, равного 12, однако для увеличения числа значений временного ряда и обучения выбранных моделей будет использоваться интервал, равный 8 часам.

Для автоматизации определения выбросов в полученных временных рядах используется метод на основе плотности точек. Суть метода заключается в том, что для каждой точки, для всех возможных окон заданного размера,

содержащих эту точку, определяется наличие количества соседей точки, удовлетворяющих функции расстояния. Если такое количество соседей превышает установленную величину, то точка не является выбросом.

На рис. 4 приведены значения временного ряда, определенные как выбросы, для временного ряда прибытия вагонов на станцию по 8-часовым интервалам. Полученные значения временных рядов, определенные как выбросы, заменяются методом скользящего среднего.

Для определения наличия тренда и сезонности в данных проводятся тесты Фостера – Стюарта и Дикки – Фуллера. Для оценки количества ретроспективных данных, подаваемых в модели для получения прогноза,

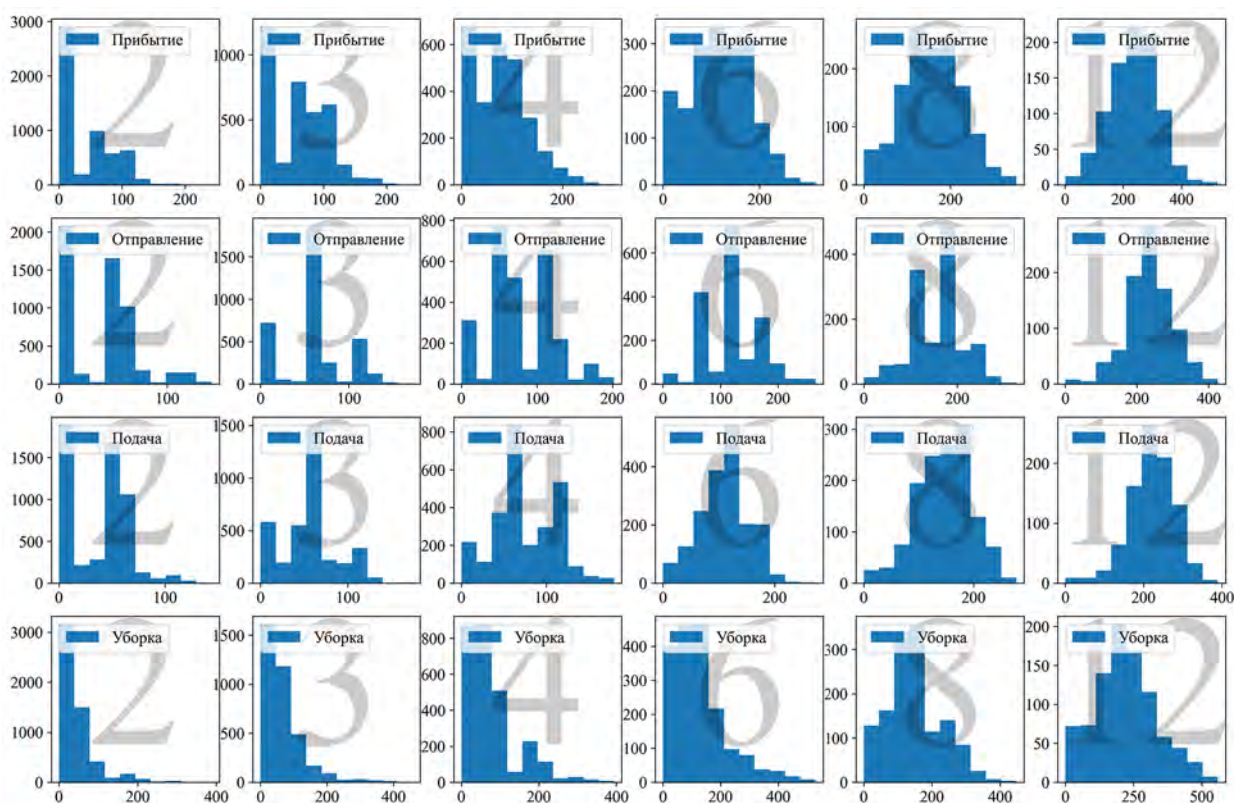
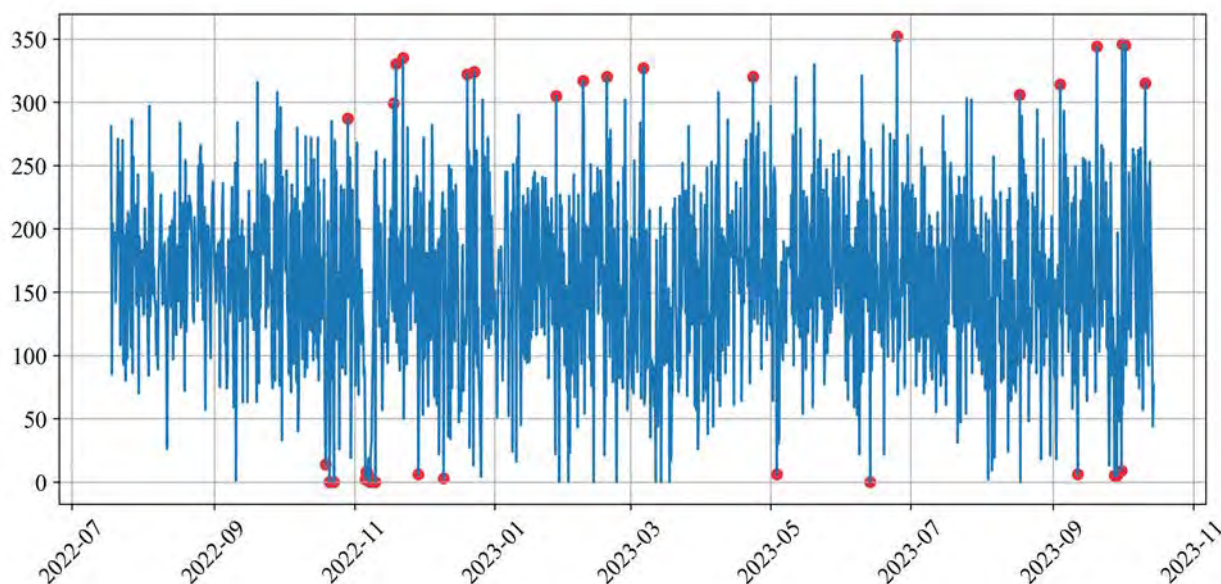


Рис. 3. Гистограммы распределения случайной величины при различных временных интервалах



**Рис. 4.** Выбросы для временного ряда прибытия вагонов

строятся функции автокорреляции и частичной автокорреляции значений временного ряда.

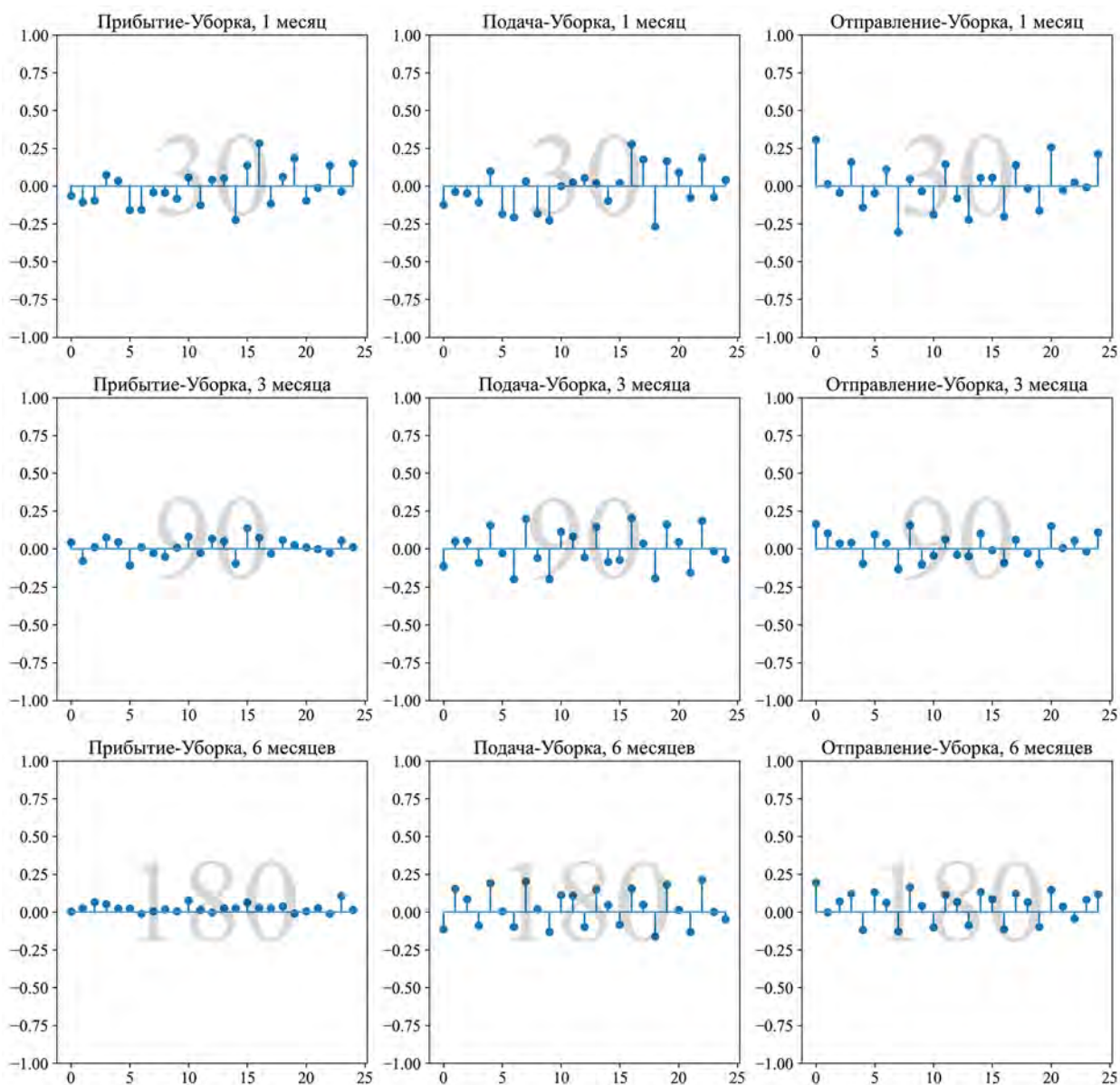
Так как специфика работы ПНОП может подразумевать изменения технологии, связанной с техническими изменениями на ПНОП, проведением плановых ремонтных работ на ПНОП, станции или железнодорожных линиях, изменением конъюнктуры груза, рода подвижного состава, то использование всего временного ряда за отчетный период может вызывать возникновение погрешностей при прогнозировании. Поэтому для последующих исследований прогнозных модели будут обучаться на данных, полученных делением исходных на 3-, 6-, 9-месячные отрезки, помимо полного набора данных.

Очевидно, что при постоянной неизменной технологии работы как станции, так и ПНОП должна наблюдаться одинаковая зависимость между количеством прибывших, отправленных, поданных и убранных вагонов. Изменения данной зависимости во

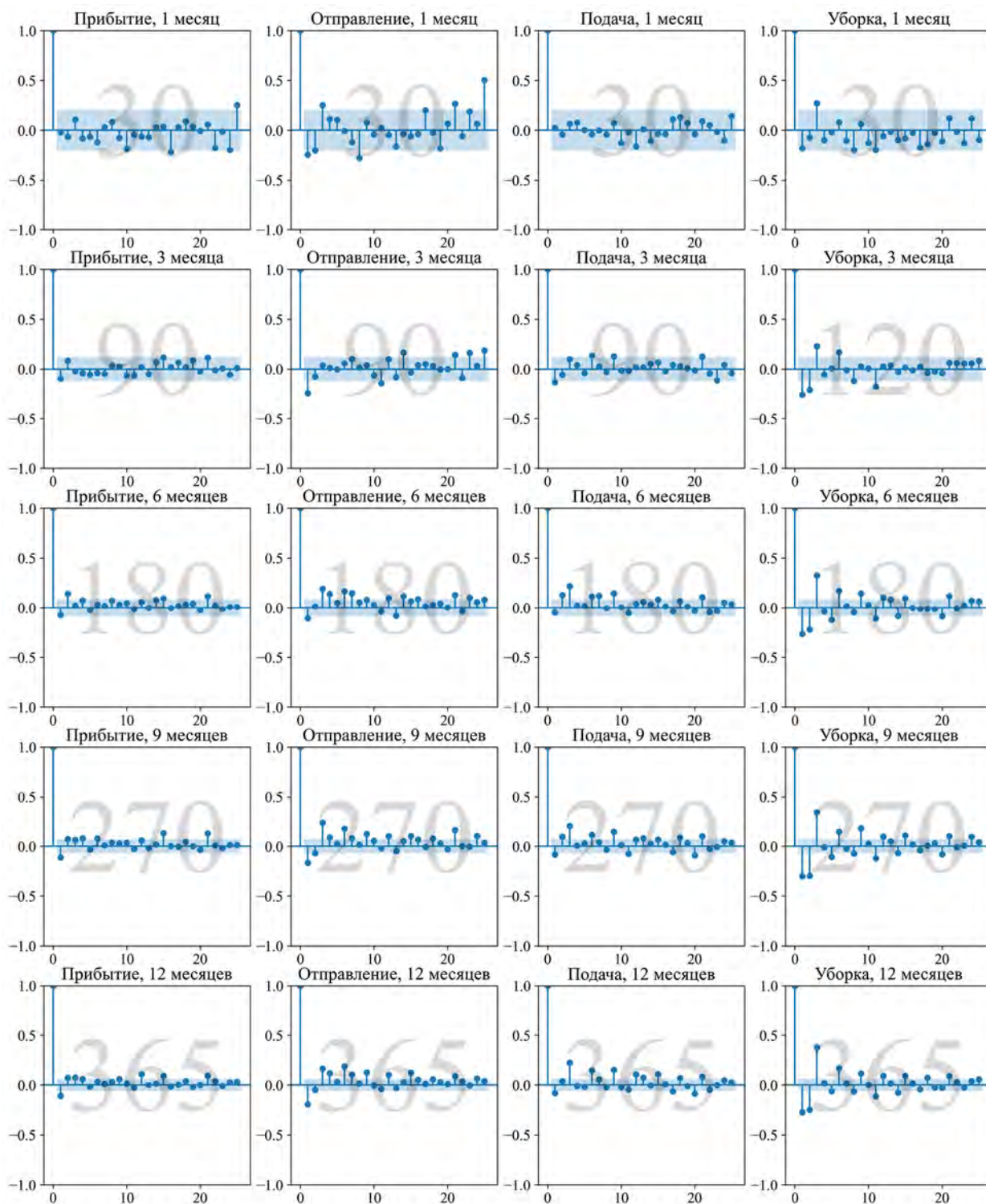
времени могут свидетельствовать об изменении технологии работы. Для наглядности сделанных выводов на рис. 5 приведены значения коэффициента кросс-корреляции пар временных рядов прибытия и подачи вагонов на ПНОП, подачи и уборки вагонов с ПНОП и уборки, и отправления вагонов со станции, полученных для исследуемых временных интервалов.

На рис. 6 приведены графики частичной автокорреляции для временных рядов прибытия, отправления, подачи и уборки для каждого рассматриваемого временного периода.

Как видно из рис. 5 и 6, с увеличением числа исходных данных, используемых для построения коэффициентов частичной автокорреляции и кросс-корреляции для некоторых временных рядов, наблюдается изменение степени значимости компонент, что свидетельствует о неоднородности технологии работы исследуемых станции и ПНОП за рассматриваемый период. Таким образом,



**Рис. 5.** Графики коэффициента кросс-корреляции для исследуемых пар временных рядов для каждого рассматриваемого временного периода



**Рис. 6.** Графики коэффициента частичной автокорреляции для временных рядов прибытия, отправления, подачи и уборки вагонов для каждого рассматриваемого временного периода



использование всего набора данных для построения краткосрочного прогноза может приводить к ухудшению качества прогноза.

Проведенные тесты Фостера – Стюарта и Дикки – Фуллера показали отсутствие сезонных и трендовых компонент в исследуемых временных рядах за весь отчетный период.

Основываясь на полученных выше исходных данных, необходимо построить краткосрочный прогноз. Для построения прогнозов будут использоваться временные ряды прибытия, отправления и погрузки вагонов, так как для них наблюдаются различные закономерности изменения величины коэффициентов автокорреляции и частичной автокорреляции для исследуемых временных периодов.

Необходимо определить, использование временных рядов какой величины рассматриваемого периода дает наилучший результат прогноза. Следует определить дальность прогноза для различных прогнозных моделей.

Методы, используемые в данной работе, разделены на три группы. В качестве базовых методов, результаты применения которых будут использоваться в качестве точки отсчета качества получаемых прогнозов, используются авторегрессионные методы (ARMA). Вторая группа методов использует нечеткие нейронные модели типа TSK [8, 9, 10] с различными функциями определения параметров нечетких правил. Третья группа методов использует нейронные сети: многослойный перцептрон, сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) различных архитектур.

Таким образом, для построения прогнозов будут использоваться ARMA-, TSK-, MLP-, Encoder-Decoder LSTM-, Transformer-модели,

обученные на временных рядах, полученных разбиением исходных данных на 8-часовые интервалы, за разные интервалы времени — от 3 до 12 месяцев.

### Построение прогнозов

В данном разделе рассматриваются прогнозы, полученные выбранными моделями. Для наиболее показательных случаев приводятся графики прогнозных и действительных значений временных рядов. В качестве критериев оценки качества получаемых прогнозов выбраны MSE-, RMSE-, MAPE- и MSPE-метрики. Приведены значения метрик для наиболее показательных значений полученных прогнозов. Обзор методов, используемых для прогнозирования временных рядов, приведен в работе [5].

В табл. 6 приведены результаты прогнозов ARMA-моделей для временных рядов прибытия, отправления, погрузки вагонов за полгода.

На рис. 7 представлен типичный результат прогноза ARMA-моделей.

В табл. 7 приведены результаты прогнозов MLP-моделей для временных рядов прибытия, отправления, погрузки вагонов за полгода.

На рис. 8 представлен результат прогноза MLP-моделей для временных рядов прибытия, отправления вагонов за полгода.

В табл. 8 приведены результаты прогнозов Encoder-Decoder LSTM-моделей для временных рядов прибытия, отправления, погрузки вагонов за 8 месяцев.

На рис. 9 представлен результат прогноза Encoder-Decoder LSTM-моделей для временных рядов прибытия, отправления вагонов за 8 месяцев.

ТАБЛИЦА 6. Результаты прогнозов ARMA за полгода

Временной ряд	MSE	RMSE	MAPE	MSPE
<b>Дальность прогноза — 20 значений</b>				
Прибытие вагонов	2650,82	51,49	39,79	63,08
Отправление вагонов	1107,13	33,27	22,91	47,86
Погрузка вагонов	1701,55	41,25	34,81	59,0
<b>Дальность прогноза — 10 значений</b>				
Прибытие вагонов	2705,04	52,01	34,54	58,77
Отправление вагонов	964,22	31,05	21,32	46,17
Погрузка вагонов	833,16	28,86	23,62	48,61

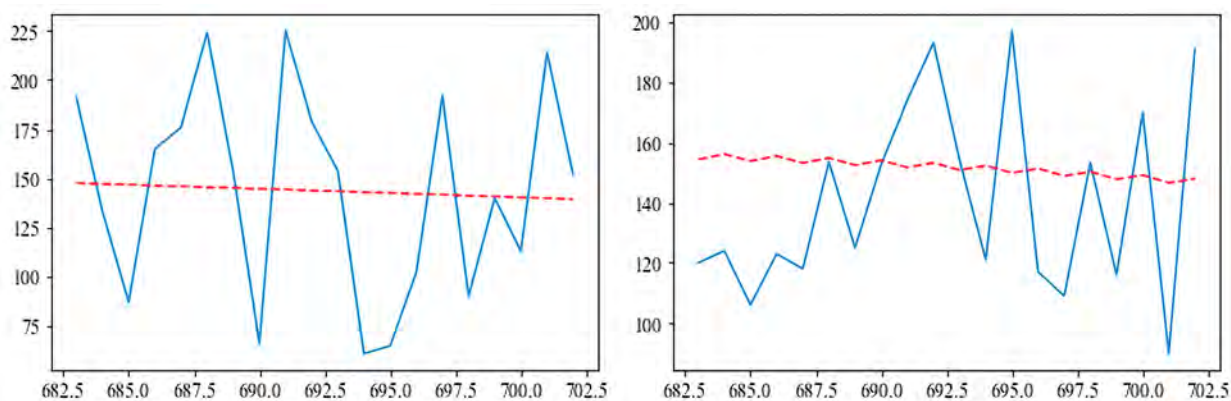


Рис. 7. Прогноз ARMA-моделей

ТАБЛИЦА 7. Результаты прогнозов MLP-моделей за полгода

Временной ряд	MSE	RMSE	MAPE	MSPE
<b>Дальность прогноза — 20 значений</b>				
Прибытие вагонов	2789,46	52,82	38,1	61,72
Отправление вагонов	870,67	29,51	18,46	42,97
Погрузка вагонов	1675,66	40,93	21,14	45,98
<b>Дальность прогноза — 10 значений</b>				
Прибытие вагонов	3101,38	55,69	35,01	59,17
Отправление вагонов	563,65	23,74	14,55	38,14
Погрузка вагонов	1002,1	31,66	15,17	38,95

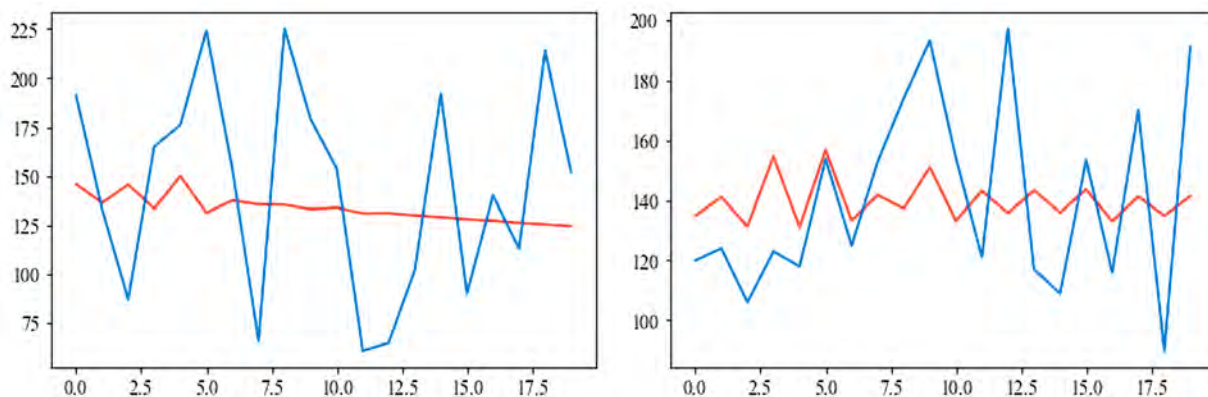


Рис. 8. Прогноз MLP-моделей

ТАБЛИЦА 8. Результаты прогнозов Encoder-Decoder LSTM-моделей за 8 месяцев

Временной ряд	MSE	RMSE	MAPE	MSPE
<b>Дальность прогноза — 20 значений</b>				
Прибытие вагонов	2318,65	48,15	34,99	59,15
Отправление вагонов	519,58	22,79	13,0	36,06
Погрузка вагонов	1881,79	43,38	27,47	52,41
<b>Дальность прогноза — 10 значений</b>				
Прибытие вагонов	1763,31	41,99	41,19	64,18
Отправление вагонов	210,68	14,51	7,58	27,54
Погрузка вагонов	2394,03	48,93	31,63	56,24

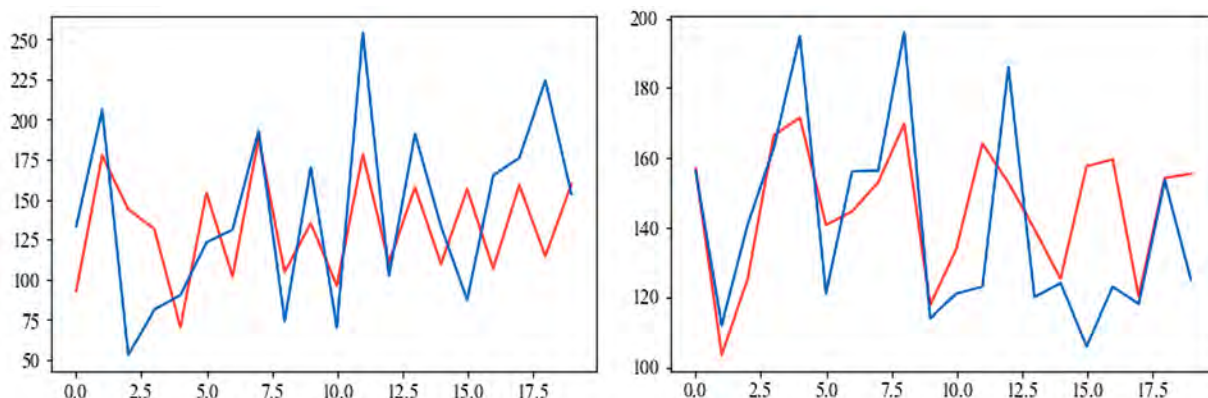


Рис. 9. Прогноз Encoder-Decoder LSTM-моделей за 8 месяцев

На рис. 10 приведены результаты прогноза Encoder-Decoder LSTM-моделей для временных рядов за весь исследуемый период.

Результаты прогнозов, полученные с использованием Encoder-Decoder LSTM-моделей, являются лучшими среди всех рассматриваемых моделей. Это связано как с отсутствием необходимости в обучении на больших наборах данных, так и с лучшей возможностью запоминания краткосрочных зависимостей.

Результаты прогнозов, полученные с использованием TSK-моделей и моделей транс-

формеров, приведены в табл. 9 и 10. Использование нейронечетких моделей и различных алгоритмов их обучения рассмотрено в работах [6–9]. Использование трансформеров для прогнозирования временных рядов рассмотрено в работе [10].

Несмотря на перспективу использования и повсеместное распространение моделей трансформеров, в последнее время результаты прогноза существенно хуже результатов Encoder-Decoder LSTM-моделей.

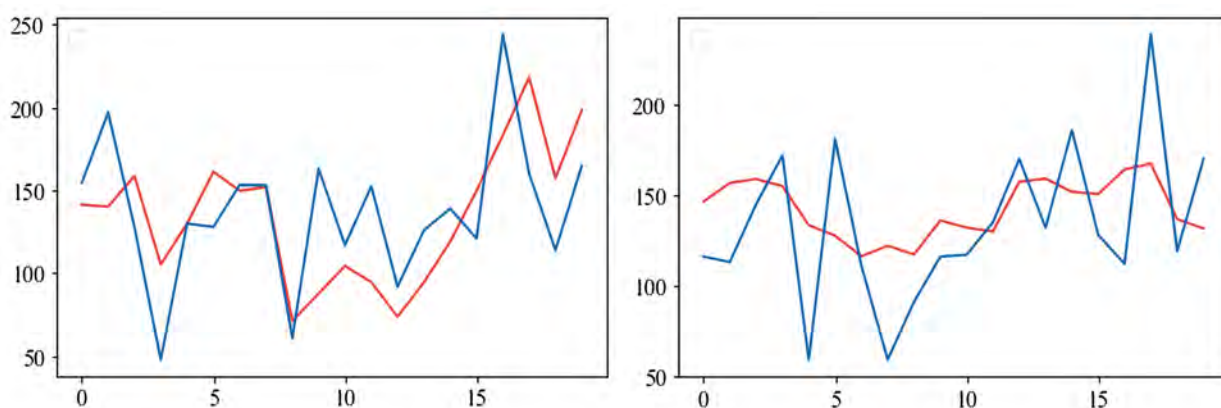


Рис. 10. Прогноз Encoder-Decoder LSTM-моделей за весь исследуемый период

ТАБЛИЦА 9. Результаты прогнозов TSK-моделей за весь исследуемый период

Временной ряд	MSE	RMSE	MAPE	MSPE
<b>Дальность прогноза — 20 значений</b>				
Прибытие вагонов	2386,19	48,85	39,41	62,78
Отправление вагонов	1193,17	34,54	21,6	46,48
Погрузка вагонов	2777,88	52,71	35,54	59,62
<b>Дальность прогноза — 10 значений</b>				
Прибытие вагонов	3101,38	55,69	35,01	59,17
Отправление вагонов	563,65	23,74	14,55	38,14
Погрузка вагонов	1002,1	31,66	15,17	38,95

ТАБЛИЦА 10. Результаты прогнозов Transformer-моделей за весь исследуемый период

Временной ряд	MSE	RMSE	MAPE	MSPE
<b>Дальность прогноза — 20 значений</b>				
Прибытие вагонов	2789,46	52,82	41,87	66,38
Отправление вагонов	870,67	29,51	18,02	37,64
Погрузка вагонов	1515,24	38,93	31,00	52,54
<b>Дальность прогноза — 10 значений</b>				
Прибытие вагонов	2989,28	54,67	38,17	64,95
Отправление вагонов	616,75	24,83	13,64	29,53
Погрузка вагонов	1202,12	34,67	34,08	70,14

### Заключение

Использование прогнозных моделей на железнодорожном транспорте при прогнозировании количественных показателей работы станций и ПНОП связано с уникальными для данной отрасли трудностями. Непостоянство технологии работы станций и ПНОП, отсутствие возможности автоматизированного сбора данных о грузовых операциях с вагонами, небольшое количество релевантных данных для обучения моделей, множество факторов, влияющих на идентичность технологии работы станции и ПНОП во времени, являются ключевыми ограничивающими факторами для построения точных прогнозов.

Разбиение исходных данных на почасовые интервалы позволяет избавиться от зависимости от неточно внесенных времен выполнения операций с вагонами на станции и ПНОП, использования промежутка исходных данных определенного размера позволяет избежать учета устаревшей технологии работы станции и ПНОП, которая будет влиять на точность получаемых прогнозов.

Улучшение качества прогнозов может быть связано с использованием многомерных временных рядов. Так, например, наличие кросс-корреляции между временными рядами прибытия и отправления вагонов, подачи и уборки свидетельствует о влиянии значительной одной случайной величины на другую.

Для временных рядов, описывающих разные технологические процессы, происходящие на станции, наблюдаются различные результаты при использовании прогнозных моделей. Так, для временного ряда отправления вагонов со станции при использовании Encoder-Decoder LTSM-моделей ошибка прогнозирования может достигать 7 %, а для временного ряда прибытия вагонов на станцию не опускается ниже 34 %. Это связано с различным количеством экзогенных факторов, влияющих на исследуемые показатели.

В последующих работах будет решена задача применения многомерных временных рядов при построении прогнозов работы объектов железнодорожного транспорта и использование полученных прогнозов в имитационных моделях.

**Библиографический список**

1. Ламехов В. А. Алгоритм построения прогнозной модели транспортно-логистической деятельности на основе применения нечетких нейронных сетей / В. А. Ламехов, Е. К. Коровяковский // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 3. С. 137–150. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-137-150.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684797 Российская Федерация. Программа автоматизированного определения количества нечетких правил и параметров antecedентов и консеквентов нечетких нейронных сетей типа TSK: № 2022684298: заявл. 07.12.2022: опубл. 19.12.2022 / В. А. Ламехов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».
3. Dolgopolov P., Konstantinov D., Rybalchenko L., et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms. *Procedia Comput Sci*, 2019. 149, 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
4. Ermakova A. V. Application of fuzzy mathematics for choosing maintenance intervals for non-public railway tracks / A. V. Ermakova // *Nexo Revista Científica*. 2021. Vol. 34, no. 6. P. 1885–1891. DOI: 10.5377/nexo.v34i06.13194. EDN DBYXRY.
5. Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. Statistical and Machine Learning forecasting methods : Concerns and ways forward. *PLoS ONE*, 2018. 13 (3) : e0194889. DOI: 10.1371/journal.pone.0194889.
6. Cárdenas J. J., García A., Romeral J. L., et al. Evolutive ANFIS training for energy load profile forecast for an IEMS in an automated factory. *ETFA*. 2011. P. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2011.6059079.
7. Zhou Y., Guo S., Chang F. Explore an evolutionary recurrent ANFIS for modelling multi-step-ahead flood forecasts. *Journal of Hydrology*, 2019.
8. Wei C., Chen T. and Lee S. k-NN Based Neuro-fuzzy System for Time Series Prediction, 2013 14<sup>th</sup> ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing. 2013. P. 569–574. DOI: 10.1109/SNPD.2013.68.
9. Pousinho H. M. I., Mendes V. M. F., Catalão J. P. S. A hybrid PSO-ANFIS approach for short-term wind power prediction in Portugal, *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52, iss. 1. P. 397–402. ISSN 0196–8904.
10. Zeng, A., Chen, M., Zhang, L., et al. Are Transformers Effective for Time Series Forecasting? *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2205.13504.

Дата поступления: 24.12.2023

Решение о публикации: 12.02.2024

**Контактная информация:**

ЛАМЕХОВ Владимир Андреевич — аспирант;  
lamekhovva@gmail.com

КОРОВЯКОВСКИЙ Евгений Константинович —  
канд. техн. наук, доцент; ekorsky@mail.com

## Construction of short-term forecast of the number of railcars at the stations and non-public routes. Results and analysis

V. A. Lamekhov, E. K. Korovyakovsky

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

**For citation:** Lamekhov V. A., Korovyakovsky E. K. Construction of short-term forecast of the number of railcars at the stations and non-public routes. Results and analysis // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 199–216. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-199-216

### Abstract

**Objective:** collect raw data for building predictive models. Analyze the initial data, identify data outliers and outliers, divide the data into time intervals, calculate correlation coefficients, partial autocorrelation, cross-correlation, analyze the trend and seasonality of the obtained time series. Using autoregressive models, machine learning models, neuro-fuzzy models to build forecasts of time series and determine the quality of the obtained forecasts. **Methods:** point density, autocorrelation, partial autocorrelation, cross-correlation, Foster-Stewart test, Dickey-Fuller test, ARMA, MLP, Encoder-Decoder LSTM, TSK, Fuzzy-Partitions, SCRG, Transformers. **Results:** we obtained estimates of the prediction accuracy of the selected models, compared the results of the predictive models trained on different samples of initial data. Conclusions are made about the efficiency and methods of building predictive models. **Practical significance:** the significance of building accurate predictive models for the key quantitative indicators of stations and non-public routes operation is shown. The factors influencing the accuracy of the obtained forecasts are analyzed.

**Keywords:** fuzzy neural networks, neural networks, autoregressive models, railway station performance analysis, forecasting.

### References

1. Lamekhov V. A. Algoritm postroenija prognoznoj modeli transportno-logisticheskoj dejatel'nosti na osnove primenenija nechetkih nejronnyh setej / V. A. Lamekhov, E. K. Korovyakovskij // B'ulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2022. № 3. S. 137–150. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-137-150. (In Russian)
2. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2022684797 Rossijskaja Federacija. Programma avtomatizirovannogo opredelenija kolichestva nechetkih pravil i parametrov antecedentov i konsekvantov nechetkih nejronnyh setej tipa TSK: № 2022684298: zajavl. 07.12.2022: opubl. 19.12.2022 / V. A. Lamekhov; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I". (In Russian)
3. Dolgopolov P., Konstantinov D., Rybalchenko L., et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms. *Procedia Comput Sci*, 2019. 149, 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
4. Ermakova A. V. Application of fuzzy mathematics for choosing maintenance intervals for non-public railway tracks / A. V. Ermakova // *Nexo Revista Científica*. 2021. Vol. 34 (6). P. 1885–1891. DOI: 10.5377/nexo.v34i06.13194. EDN DBYXRY.
5. Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLoS ONE*, 2018. 13 (3): e0194889. DOI: 10.1371/journal.pone.0194889.
6. Cárdenas J. J., García A., Romeral J. L., et al. Evolutionary ANFIS training for energy load profile forecast for an IEMS in an automated factory. *ETFA*. 2011. P. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2011.6059079.

7. Zhou Y., Guo S., Chang F. Explore an evolutionary recurrent ANFIS for modelling multi-step-ahead flood forecasts. *Journal of Hydrology*, 2019.

8. Wei C., Chen T. and Lee S. k-NN Based Neuro-fuzzy System for Time Series Prediction, 2013 14<sup>th</sup> ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing. 2013. P. 569–574. DOI: 10.1109/SNPD.2013.68.

9. Pousinho H. M. I., Mendes V. M. F., Catalão J. P. S. A hybrid PSO-ANFIS approach for short-term wind power prediction in Portugal, *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. Iss. 1. P. 397–402. ISSN 0196–8904.

10. Zeng, A., Chen, M., Zhang, L., et al. Are Transformers Effective for Time Series Forecasting? AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2205.13504.

Received: 24.12.2023

Accepted: 12.02.2024

**Author's information:**

Vladimir A. LAMEKHOV — Postgraduate Student;  
lamekhovva@gmail.com

Evgeny K. KOROVYAKOVSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; ekorsky@mail.com



УДК 624.21

## Экспериментальные исследования динамической работы железнодорожных мостов при воздействии высокоскоростного подвижного состава

Е. Е. Луковников<sup>1</sup>, Л. К. Дьяченко<sup>2</sup>, И. М. Смирнов<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup> ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений», Россия, 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 113а

**Для цитирования:** Луковников Е. Е., Дьяченко Л. К., Смирнов И. М. Экспериментальные исследования динамической работы железнодорожных мостов при воздействии высокоскоростного подвижного состава // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 217–228. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-217-228

### Аннотация

Вопрос учета динамического взаимодействия железнодорожного подвижного состава и конструкций мостовых сооружений особенно важен при решении задач повышения скоростей движения поездов на действующих железнодорожных линиях, а также при назначении скоростного режима на проектируемых мостовых сооружениях. Рациональный учет параметров динамического взаимодействия позволяет выполнять полные и достоверные расчеты элементов мостовых сооружений, что, в свою очередь, благоприятно сказывается на прогнозировании периода и характера эксплуатации сооружений и, как следствие, на экономической составляющей проектов. Современное решение задачи динамического взаимодействия сводится к определению степени влияния каждого компонента единой механической системы «мост — путь — поезд». **Целью** настоящего исследования является качественное определение параметров динамического взаимодействия посредством экспериментальных измерений напряжений, ускорений и перемещений элементов конструкций мостового сооружения, расположенного на действующей железнодорожной линии с организованным высокоскоростным движением поездов. **Методом** исследования в настоящей работе является экспериментальное измерение при помощи высокочастотных датчиков напряжений, ускорений и перемещений с последующей статистической обработкой и анализом полученных результатов. **Результаты** исследования представлены в виде графиков и таблиц, отображающих изменение измеряемых величин относительных деформаций, ускорений и перемещений во времени. **Практическая значимость** настоящего исследования заключается в оценке степени влияния компонентов динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и мостового сооружения, что позволяет сформировать целостную картину природы процесса динамического взаимодействия.

**Ключевые слова:** ВСМ, высокоскоростная магистраль, динамическое взаимодействие, высокоскоростной поезд, мостовое сооружение, колебания пролетных строений.

### Введение

Исследование динамического взаимодействия подвижного состава и мостовых сооружений является одной из самых важных задач в области проектирования мосто-

вых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях [1]. Характер динамического взаимодействия напрямую влияет на назначение основных параметров

конструкций мостовых сооружений [2], что, в свою очередь, неразрывно связано с экономическими показателями проектов.

Понимание природы процесса динамического взаимодействия мостовых сооружений и железнодорожного подвижного состава [3] позволяет выполнять наиболее эффективные расчеты при конструировании мостовых сооружений, а также назначать оптимальные скорости движения поездов в вопросе комфорта и безопасности проезда пассажиров и грузов.

Настоящее экспериментальное исследование динамического взаимодействия железнодорожного подвижного состава и мостовых сооружений является продолжением исследований, описанных в работах [4] и [5]. В данной статье представлены результаты детального исследования параметров динамической реакции железнодорожного моста при проезде высокоскоростных поездов «Сапсан».

### **Цели экспериментальных измерений**

Исследование посвящено экспериментальному определению параметров динамического взаимодействия подвижного состава и мостового сооружения, расположенного на действующей железнодорожной линии с организованным высокоскоростным движением поездов.

Для создания полной и целостной картины динамического взаимодействия подвижного состава и мостового сооружения при проведении экспериментальных исследований были разработаны несколько схем расположения измерительных датчиков. Измерительное оборудование регистрировало относительные деформации (напряжения), ускорения и перемещения в характерных сечениях и элементах мостового сооруже-

ния при проезде высокоскоростного поезда «Сапсан».

Данные, полученные при измерениях, позволяют выполнить качественный анализ напряженно-деформированного состояния основных конструкций моста [6] при проезде высокоскоростного поезда в динамической постановке. В дальнейшем результаты измерений могут быть использованы при верификации расчетной модели динамического взаимодействия подвижного состава и мостовых сооружений [7], полученной на основе численного моделирования.

### **Объект и средства экспериментальных исследований**

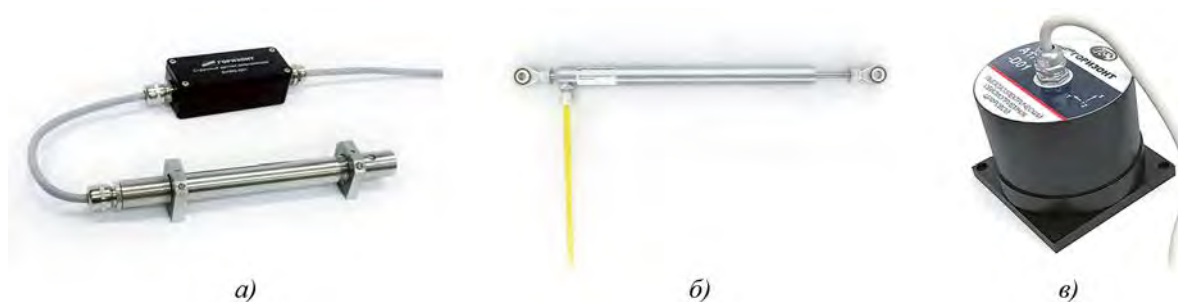
Экспериментальные исследования проводились на двухпутном девятипролетном мостовом переходе (рис. 1) на линии Санкт-Петербург — Москва. Расчетная схема сооружения —  $9 \times 55,00$  м под каждый путь. Пролетные строения — сталежелезобетонные, статическая схема — балочная разрезная, опоры моста — массивные, из монолитного железобетона с фундаментом на свайном основании. Подробное описание конструкции мостового сооружения приведено ранее в работе [4].

Измерительное оборудование включало в себя комплект струнных датчиков относительных деформаций (напряжений) (рис. 2, а) с частотой измерения 100 Гц, индуктивных датчиков перемещений (рис. 2, б) с частотой измерения 100 Гц и трехосных акселерометров (рис. 2, в) с частотой записи 625 Гц.

Измерительные датчики соединяются с блоком сбора данных посредством прокладки временных кабельных линий. Питание измерительной системы осуществляется автономно за счет энергоемких аккумулятор-



**Рис. 1.** Место проведения экспериментальных измерений — мостовой переход на линии Санкт-Петербург — Москва. Фотографии предоставлены автором



**Рис. 2.** Измерительное оборудование, использованное при проведении экспериментальных исследований: а) датчик относительных деформаций; б) индукционный датчик перемещений; в) трехосный акселерометр.  
Фотографии предоставлены автором

ных батарей, установленных в блоке сбора данных. Блок сбора данных подключался к ноутбуку через кабель USB, запуск измерений осуществлялся с ноутбука, при запуске системы измерения обеспечивалась синхронизация регистрации данных всеми датчиками по времени.

Исходя из условий удобства прокладки кабельных линий, а также условий ограничения длины кабельных линий по пропуску высокочастотного сигнала измерительной системы, всего было реализовано 4 экспериментальные схемы измерения с различным порядком установки датчиков.

1. **Первая схема** предусматривала установку на пролетном строении № 1 по 2 датчика относительных деформаций в опорных сечениях (над устоем № 0 и промежуточной опорой № 1) на вертикальных стенках главных балок, 4 датчика относительных деформаций и 1 акселерометр в среднем сечении на горизонтальных листах (верхний и нижний пояс) главных балок, 2 индукционных датчика перемещений со стороны подвижных опорных частей над опорой № 1 и 1 акселерометр на оголовке опоры № 1.

2. При реализации **второй схемы** на пролетном строении № 2 были установлены по 2 датчика относительных деформаций в опорных сечениях (над промежуточными опорами № 1 и 2) на вертикальной стенке главных балок, 4 датчика относительных деформаций и 1 акселерометр в среднем сечении на горизонтальных листах (верхний и нижний пояс) главных балок, 2 индукционных датчика перемещений со стороны подвижных опорных частей над опорой № 2 и 1 акселерометр на опоре № 2.

3. В **третьей схеме** эксперимента в средних сечениях пролетных строений № 2 и № 3 располагалось по 4 датчика относительных деформаций и по 1 акселерометру. На промежуточной опоре № 2 со стороны подвижных опорных частей были установлены 2 индукционных датчика перемещений и 1 акселерометр на оголовке опоры.

4. В **четвертой схеме** эксперимента 4 датчика относительных деформаций располагались в среднем сечении пролетного строения № 2. На нижних поясах пролетных строений № 3 и № 4, в средних сечениях было установлено по 2 датчика относительных деформаций. Акселерометры при данной схеме располагались в серединах пролетных строений № 2, 3 и 4. Индукционные датчики

перемещений были установлены со стороны подвижной опорной части над промежуточной опорой № 2.

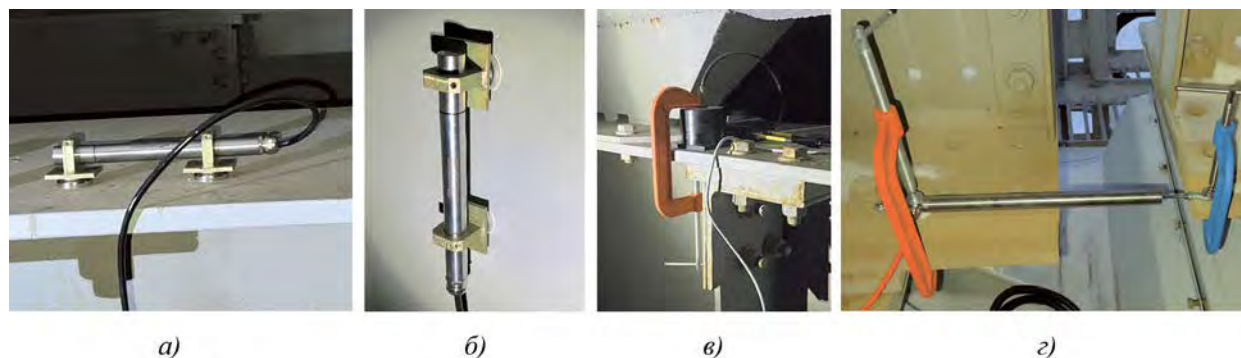
Примеры установки измерительных датчиков представлены на рис. 3. Общая протяженность кабельных линий в максимальной развертке (по 4-й схеме) составила 380 м. Всего было выполнено более 20 экспериментальных измерений проездов поезда «Сапсан» по мостовому сооружению.

### Результаты экспериментальных измерений

По результатам экспериментальных исследований получены данные о динамическом взаимодействии высокоскоростного подвижного состава и рассматриваемого мостового сооружения в объеме, достаточном для их всестороннего анализа. Анализ результатов экспериментальных исследований состоял из нескольких этапов качественной и количественной оценки изменения каждого измеренного параметра во времени, а также установления зависимостей их взаимного влияния на изменение напряженно-деформируемого состояния основных конструкций мостового сооружения [8].

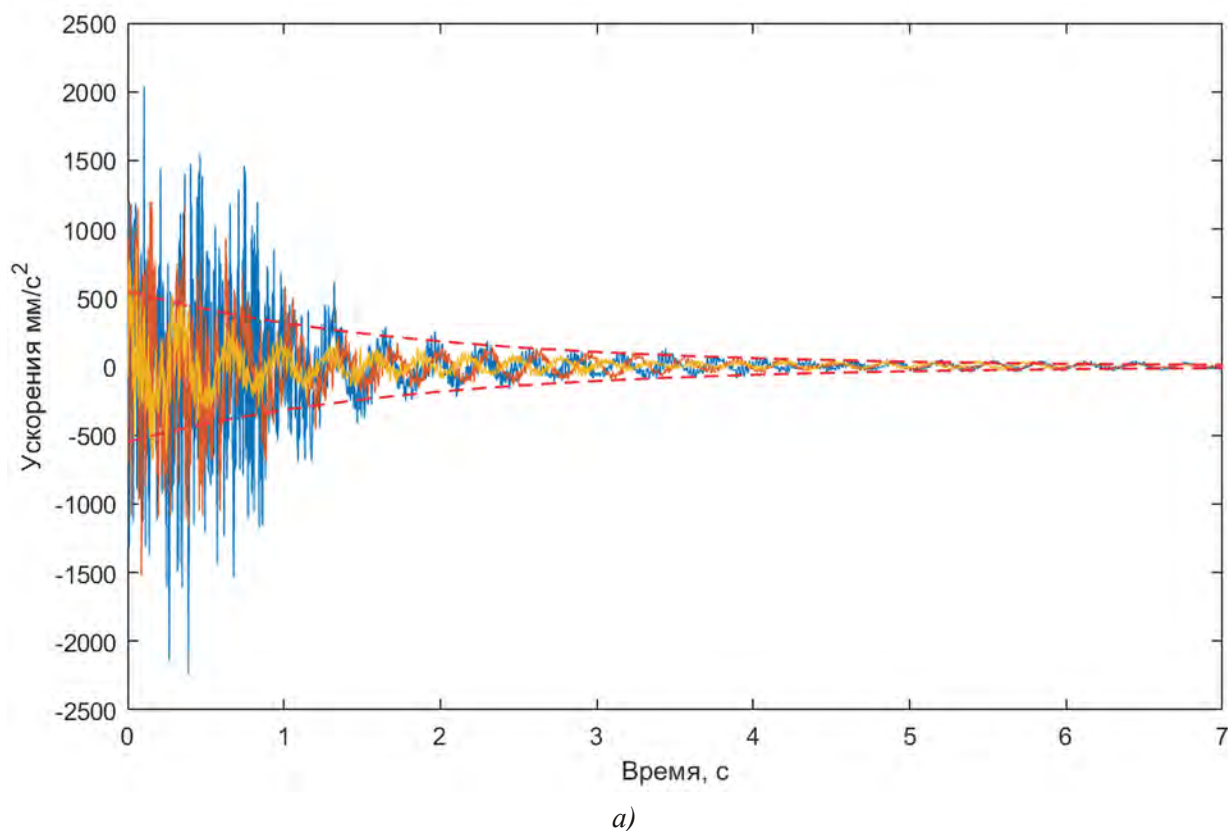
Для определения основных динамических параметров и особенностей колебательного процесса выполнена оценка диссипативных свойств пролетных строений [9] по результатам обработки акселерограмм колебаний пролетных строений в середине пролета и определению эквивалентного коэффициента затухания колебаний (рис. 4).

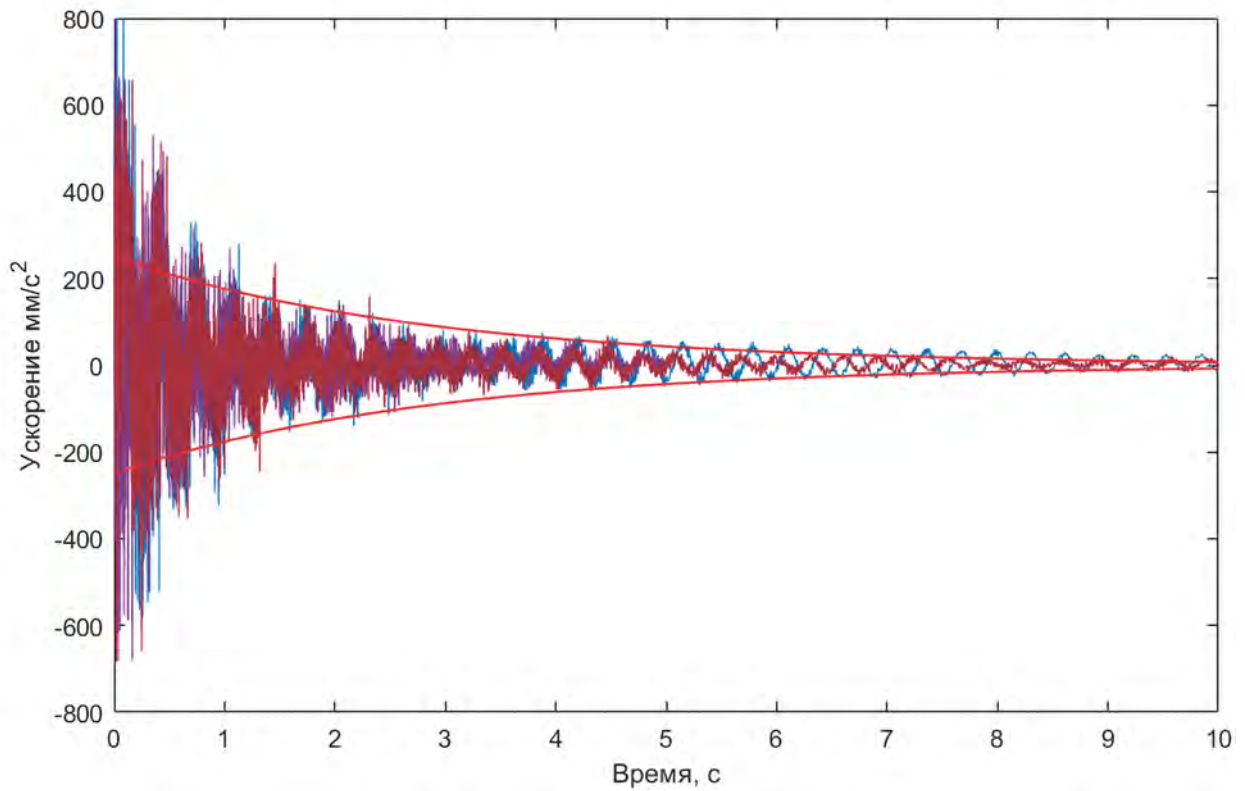
На основании анализа полученных эквивалентных коэффициентов затухания (табл. 1) может быть сделан вывод о наличии тенденции роста коэффициента затухания колебаний пролетных строений с увеличением высоты промежуточных опор.



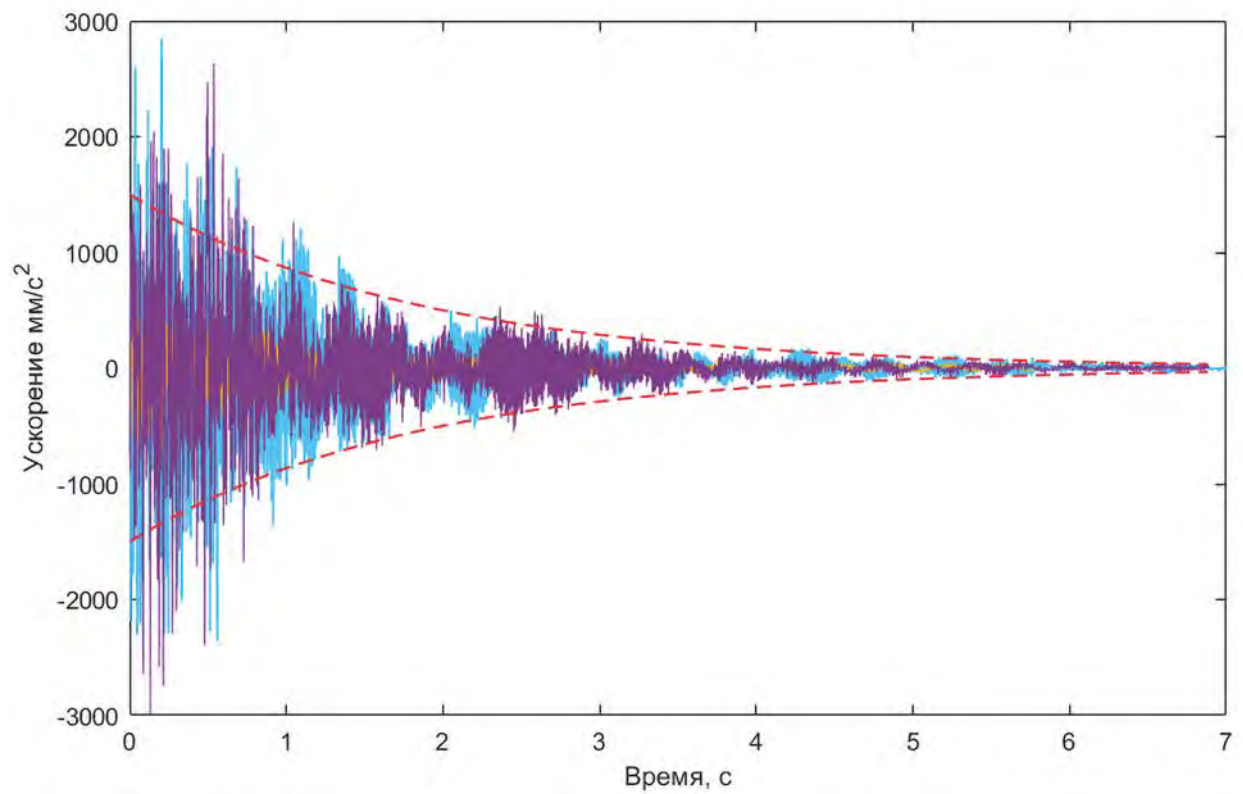
**Рис. 3.** Примеры установки измерительных датчиков:

- а) датчик относительных деформаций на верхнем поясе главной балки пролетного строения;
- б) датчик относительных деформаций на вертикальной стенке главной балки;
- в) трехосный акселерометр на верхнем поясе главной балки;
- г) индукционный датчик перемещений над подвижной опорной частью

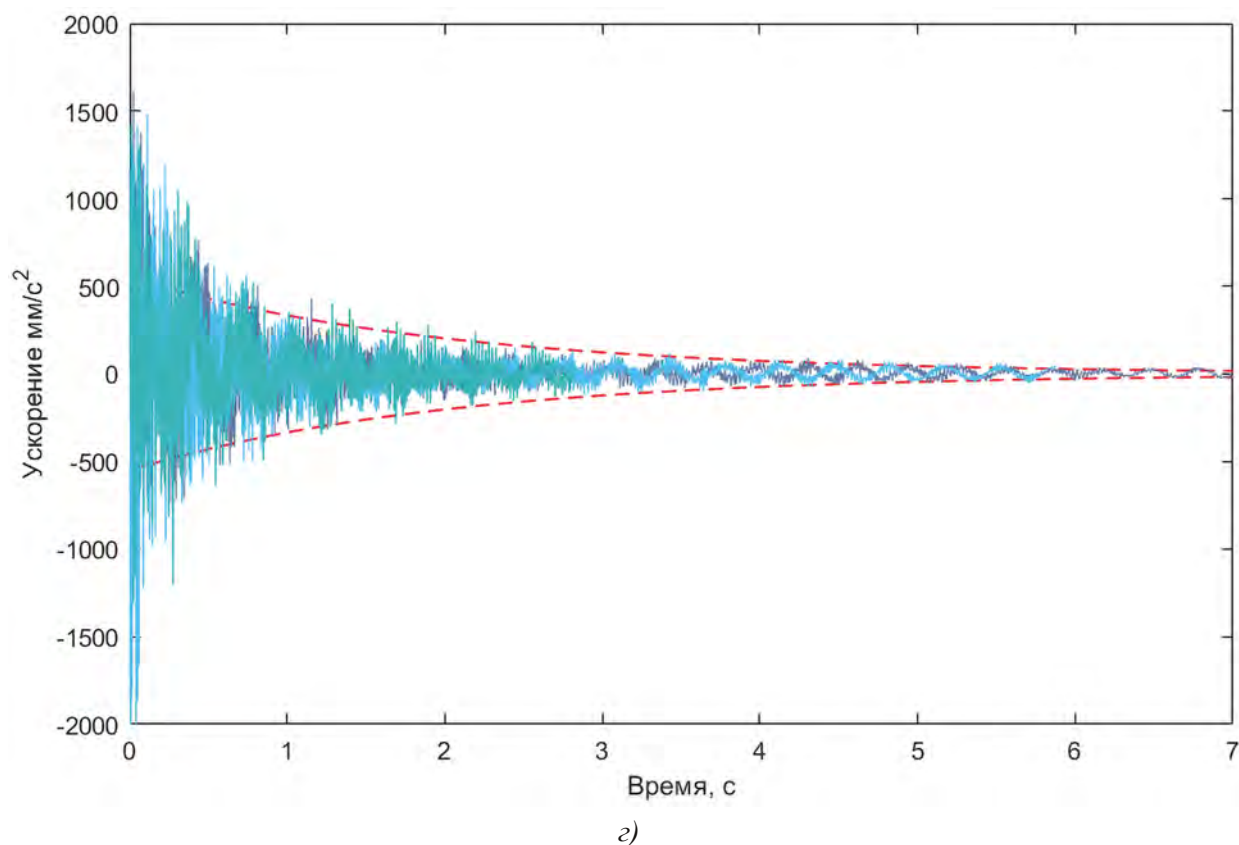




б)



в)



**Рис. 4.** Фрагмент акселерограмм колебаний в середине пролетных строений (свободные колебания после схода поезда): а) пролетное строение № 1; б) пролетное строение № 2; в) пролетное строение № 3; г) пролетное строение № 4

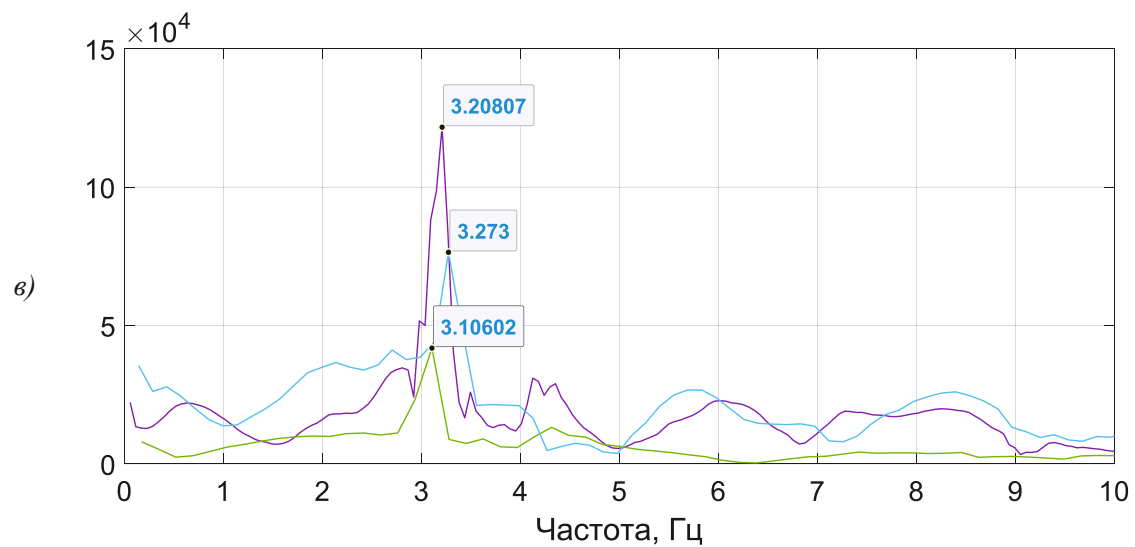
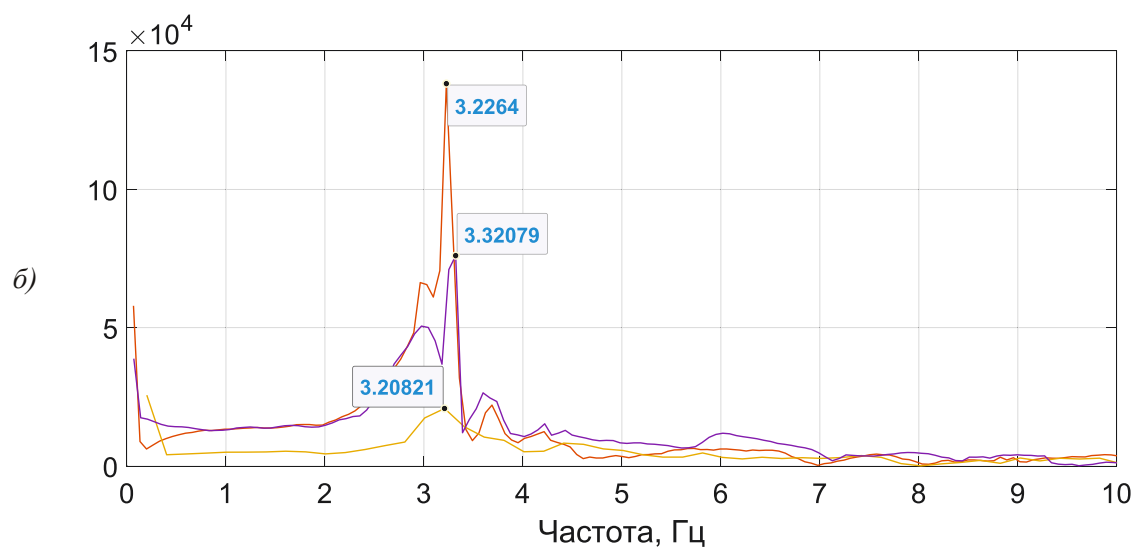
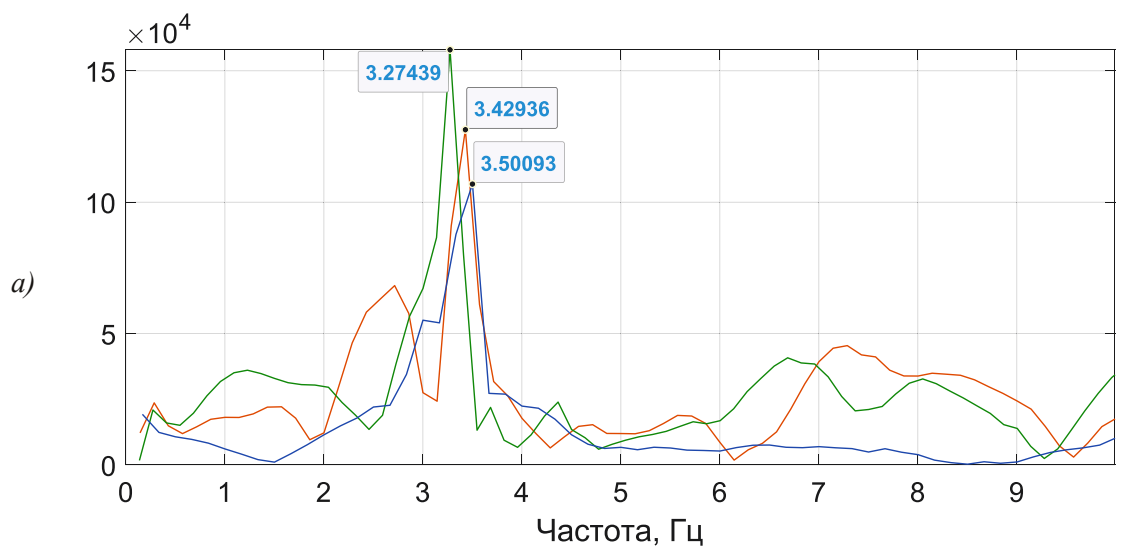
В ходе обработки экспериментальных данных был выполнен их гармонический анализ и определены собственные частоты колебаний пролетных строений (рис. 5).

Сводные результаты определения эквивалентных коэффициентов затухания и основной собственной частоты колебаний пролетных строений представлены в табл. 1.

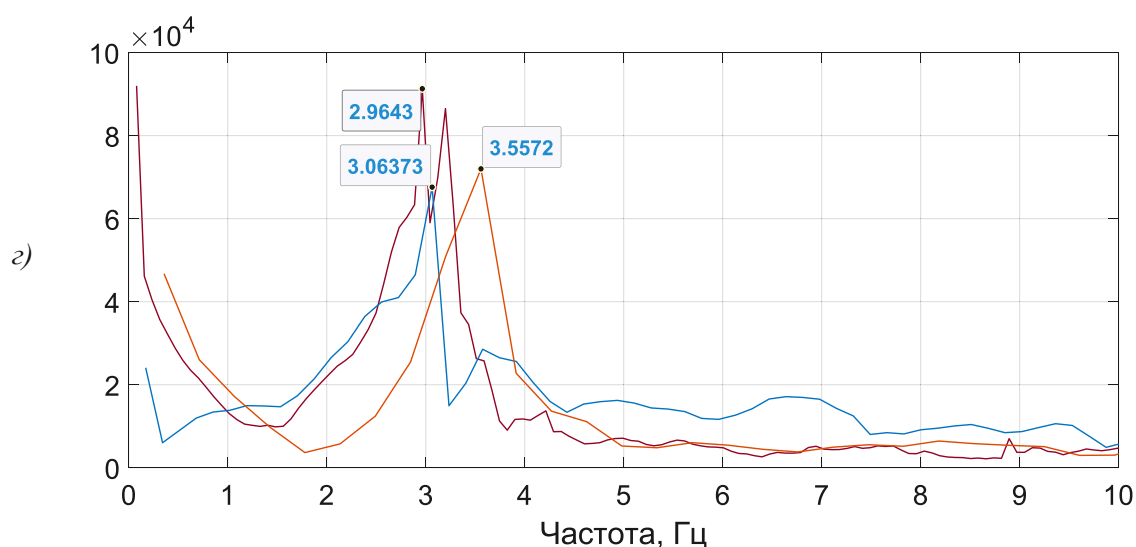
При анализе полученных результатов была выявлена закономерность снижения частоты собственных колебаний пролетных строений при увеличении высоты промежуточных опор. Также наблюдается неко-

торое отличие экспериментальных величин собственных частот колебания конструкций пролетных строений, представленных в исследовании [4], что свидетельствует о влиянии температуры окружающего воздуха на механические параметры верхнего строения пути [10], включающегося в совместную работу с пролетными строениями.

Одной из причин выявленных несоответствий может также являться изменение характера работы опорных частей в зависимости от температурных условий проведения экспериментальных исследований.







**Рис. 5.** Амплитудно-частотная характеристика пролетных строений № 1–4:  
 а) пролетное строение № 1 по схеме 1; б) пролетное строение № 2 по схеме 4;  
 в) пролетное строение № 3 по схеме 4; г) пролетное строение № 4 по схеме 4

ТАБЛИЦА 1. Распределение коэффициента затухания и собственных частот колебаний по каждому пролетному строению

Параметр колебаний		ПС № 1	ПС № 2	ПС № 3	ПС № 4
Частота первой формы собственных колебаний	Схема № 1	3,402	–	–	–
	Схема № 2	–	3,355	–	–
	Схема № 3	–	<b>3,206</b>	<b>3,138</b>	–
	Схема № 4	–	<b>3,252</b>	<b>3,196</b>	<b>3,195</b>
Коэффициент затухания		0,3–0,4	0,3–0,4	0,35–0,5	0,5–0,55

## Заключение

Выполненные в настоящей работе экспериментальные исследования позволили получить данные, предоставившие возможность сделать анализ фактического напряженно-деформированного состояния основных конструкций мостового сооружения при их динамическом взаимодействии с высокоскоростным подвижным составом. В отличие от предыдущих исследований [4–5] впервые измерения выполнялись с целью изучения совместной динамической работы всех элементов мостового сооружения (верхнего строения пути, пролетных строений, опорных частей и опор).

На основе полученных результатов в ходе дальнейших исследований может быть выполнена верификация комплексной эквивалентной численной расчетной модели, что позволит достоверно установить взаимосвязь между определяющими параметрами механической системы «мост — путь — поезд». Подобные комплексные расчетно-экспериментальные исследования являются основой совершенствования и развития нормативной базы по проектированию и эксплуатации мостовых сооружений в условиях высокоскоростного движения.

**Библиографический список**

1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта, в 2 томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, М. Я. Брынь и др.; под ред. И. П. Киселева. Допущено Федеральным агентством железнодорожного транспорта. Т. 1. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2020. 428 с.

2. Смирнов В. Н., Дьяченко А. О., Дьяченко Л. К. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 3. С. 69–81.

3. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др. М.: Транспорт, 1984. 272 с.

4. Исследование динамической работы пролетных строений железнодорожных мостов / Е. Е. Луковников, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин и др. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (66). С. 41–50.

5. Комплексные измерения динамического и аэродинамического воздействий высокоскоростного подвижного состава на мостовые сооружения / Н. А. Лабутин, А. В. Ланг, Е. Е. Луковников и др. // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 2 томах, Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2022 года /

ответств. за выпуск: О. В. Гимазетдинова, М. С. Панова. Т. 1. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. С. 34–38.

6. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов и др.. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2015. 274 с.

7. Иванченко И. И. Динамика транспортных сооружений: высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. М.: Наука, 2011. 574 с.

8. Fryba L. Dynamics of Railway Bridges. Praha: Academia Praha, 1996. 326 p.

9. Загора А. Л., Казакевич М. И. Гашение колебаний мостовых конструкций / под ред. Н. Г. Бондаря. М.: Транспорт, 1983. 134 с.

10. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовым сооружением на высокоскоростных магистралях. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 96 с.

Дата поступления: 01.02.2024

Решение о публикации: 26.02.2024

**Контактная информация:**

ЛУКОВНИКОВ Егор Евгеньевич — аспирант;  
lee0202@vk.com

ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович —  
канд. техн. наук, генеральный директор;  
lkdiachenko@ebs-spb.tech

СМИРНОВ Иван Михайлович — аспирант;  
sm.ivan00@gmail.com

## Experimental research of the dynamic work of railway bridges under the influence of high-speed rolling stock

E. E. Lukovnikov<sup>1</sup>, L. K. Diachenko<sup>2</sup>, I. M. Smirnov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> “Engineering bureau of structures” LLC, 113A, nab. reki Fontanki, Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Lukovnikov E. E. Diachenko L. K., Smirnov I. M. Experimental research of the dynamic work of railway bridges under the influence of high-speed rolling stock // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 217–228. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-217-228. (In Russian)*

### Abstract

The issue of considering the dynamic interaction of the railway rolling stock and the structures of bridge structures is especially important when solving the tasks of increasing the speeds of trains on the existing railway lines, as well as when prescribing high-speed mode on designed bridges. Rational accounting of the parameters of dynamic interaction allows you to perform complete and reliable calculations of elements of bridge structures, which in turn has a beneficial effect on predicting the period and nature of the operation of structures and, because of the economic component of projects. The modern solution to the problem of dynamic interaction is reduced to determining the degree of influence of each component of the unified mechanical system of the bridge-travel. **Objective:** the purpose of this study is to determine the parameters of dynamic interaction through experimental measurements of stresses, accelerations, and displacements of structures of the bridge structure located on the existing railway line with an organized high-speed traffic movement. **Methods:** experimental measurement using high-frequency voltage sensors, accelerations and movements with subsequent statistical processing and analysis of the results. **Results:** graphs and tables displaying a change in the measured values of relative deformations, accelerations, and movements over time. Practical importance: **The practical significance** of this study is to assess the degree of influence of the components of the dynamic interaction of high-speed rolling composition and the bridge structure, which allows you to form a holistic picture of the nature of the process of dynamic interaction.

**Keywords:** HSR, high-speed line, dynamic interaction, high-speed train, bridge structures, vibrations of spans.

### References

1. Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj transport. Obshchij kurs: ucheb. posobie dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta, v 2 tomah / I. P. Kiselev, L. S. Blazhko, M. Ya. Bryn' i dr.; pod red. I. P. Kiseleva. Dopushcheno Federal'nym agentstvom zheleznodorozhnogo transporta. T. 1. 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. M.: federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”. 2020. 428 s. (In Russian)
2. Smirnov V. N., D'yachenko A. O., D'yachenko L. K. Osobennosti proektirovaniya mostov na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2017. No. 3. S. 69–81. (In Russian)
3. Vzaimodejstvie zheleznodorozhnyh mostov s podvizhnym sostavom / N. G. Bondar', Yu. G. Koz'min, Z. G. Rojtburd i dr. M.: Transport, 1984. 272 s. (In Russian)
4. Issledovanie dinamicheskoy raboty proletnyh stroenij zheleznodorozhnyh mostov / Lukovnikov E. E., Lang A. V., Labutin N. A. i dr. // Vestnik Sibirskogo gosudarst-

vennogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. No. 3 (66). S. 41–50. (In Russian)

5. Kompleksnye izmereniya dinamicheskogo i aerodinamicheskogo vozdeystvij vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava na mostovye sooruzheniya / Labutin N. A., Lang A. V., Lukovnikov E. E. i dr. // Transport: problemy, idei, perspektivy: sb. trudov LXXXII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, v 2 tomah, Sankt-Peterburg, 18–25 aprelya 2022 goda / otvetstv. za vypusk: O. V. Gimazetdinova, M. S. Panova. T. 1. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2022. S. 34–38. (In Russian)

6. Mosty na vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh magistralyah / Smirnov V. N., Baranovskij A. A., Bogdanov G. I. i dr. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2015. 274 s. (In Russian)

7. Ivanchenko I. I. Dinamika transportnyh sooruzhenij: vysokoskorostnye podvizhnye, sejsmicheskie i udarnye nagruzki. M.: Nauka, 2011. 574 s. (In Russian)

8. Fryba L. Dynamics of Railway Bridges. Praha: Academia Praha, 1996. 326 p.

9. Zakora A. L., Kazakevich M. I. Gashenie kolebanij mostovyh konstrukcij / pod red. N. G. Bondarya. M.: Transport, 1983. 134 s. (In Russian)

10. Smirnov V. N. Vzaimodejstvie besstykovogo puti s mostovym sooruzheniem na vysokoskorostnyh magistralyah. M.: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2015. 96 s. (In Russian)

Received: 01.02.2024

Accepted: 26.02.2024

**Author's information:**

Egor E. LUKOVNIKOV — Postgraduate Student;  
lee0202@vk.com

Leonid K. DIACHENKO — PhD in Engineering, Chief Executive Officer “Engineering bureau of structures” LLC.; lkdiachenko@ebs-spb.tech

Ivan M. SMIRNOV — Postgraduate Student;  
sm.ivan00@gmail.com

УДК 621.311.61, 656.025.4

## Оптимизация перевозок термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах с применением альтернативных источников энергии

**И. Г. Киселев, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский**

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

**Для цитирования:** Киселев И. Г., Комиссаров С. Б., Монастырский Д. Я. Оптимизации перевозок термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах с применением альтернативных источников энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 229–237. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237

### Аннотация

**Цель:** рассмотреть основные проблемы перевозки термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах (рефконтейнеры), показать возможности оптимизации перевозок путем внедрения альтернативных источников энергии. **Метод:** выполнено сравнение технико-экономических показателей дизельных, водородных установок. Применен эксергетический метод оценки эффекта от замены дизельного топлива на СПГ. **Результаты:** в статье определены особенности перевозки грузов в контейнерах со встроенными холодильными установками — автономными рефконтейнерами. Приведена классификация существующих энергоустановок для электропитания рефконтейнеров. Описана конструкция автономной установки для энергоснабжения рефконтейнеров. Предложены экологически безопасные альтернативы для обеспечения автономного электропитания холодильных установок рефконтейнеров. Представлены преимущества автономного источника электропитания на основе высокотемпературных топливных элементов. Описана автономная энергоустановка со сжиженным природным газом (СПГ) в качестве топлива. Проанализирована целесообразность утилизации холода от регазификации СПГ с целью обеспечения стабильности функционирования рефконтейнера. Сделана оценка предполагаемого эффекта от применения альтернативных видов топлива для автономного электропитания. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для модернизации энергетических установок малой мощности, применяемых на рефрижераторном и других видах транспорта.

**Ключевые слова:** автономные энергоустановки, высокотемпературные топливные элементы, сжиженный природный газ, холодильный транспорт, автономные рефконтейнеры.

### Введение

Согласно актуальным данным, до трети всех производимых продуктов питания утрачивают качественные характеристики во время перевозки [1]. К примеру, на железнодорожном транспорте в Российской Федерации ежегодно теряется от 4 до 15% замороженной рыбы, что приносит убытки миллионы рублей и вынуждает Правитель-

ство Российской Федерации предоставлять субсидии перевозчикам [2]. Среди основных причин потерь — нарушения предписанных процедур в пути следования, нарушение техники погрузочно-разгрузочных работ, прохождение через неучтенные климатические зоны, неисправности оборудования и человеческий фактор [3]. Для снижения

потерь все чаще используются автономные рефконтейнеры со встроенной холодильной установкой в комплексе с дизельным генератором. Энергетическая автономность рефконтейнера обеспечивает сохранность груза при мультимодальных перевозках и сокращает время доставки за счет применения контейнерных поездов вместо формирования традиционных рефрижераторных сцепов с вагоном-электростанцией или отсутствия необходимости подключения вагонов к сети контейнеровоза или промежуточного пункта.

Современная энергетическая повестка поднимает вопрос о своевременной адаптации электропитания рефконтейнеров для обеспечения стабильности функционирования задействованных энергосистем.

### Электропитание автономных рефконтейнеров дизельными установками

Современные дизельные установки для электроснабжения специальных контейнеров могут быть встроенными или навесными.

Потребляемая электрическая мощность холодильных установок рефконтейнеров сравнительно невелика, до 24 кВт, поэтому наибольшее распространение получили мобильные навесные дизельные генераторы (дженсеты). Указанные установки отличаются значительным уровнем шума (70–110 дБ), сложностью конструкции, дорогостоящим обслуживанием и значительной снаряженной массой — до 1,5 тонны (табл. 1).

В дизельных выбросах содержатся оксиды углерода, азота, диоксида серы, сажа и другие загрязняющие атмосферу вещества, что не соответствует экологическим инициативам ведущих экономик мира, принятым в рамках Парижского соглашения 2015 года. Для приведения дизельного топлива к стан-

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики дизельного дженсета

Показатель	Значение
Номинальная мощность	15,4 кВт
Расход топлива (плотность 860 кг/м <sup>3</sup> )	3,5 л/ч
Масса дженсета без топлива	830 кг
Объем бака	492 л

дартам «Евро-5» применяются дорогостоящие присадки и технологически сложные системы нейтрализации выбросов, что, в свою очередь, повышает цены на топливо и оборудование.

### Электропитание автономных рефконтейнеров водородными установками

Для электропитания рефконтейнеров подходят любые топливные элементы, но в первую очередь благодаря своим характеристикам рассматриваются твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), питаемые водородом любого качества, метаном, синтез-газом и другими видами топлива [4]. ТОТЭ отличаются высокими рабочими температурами в интервале от 650 до 1000 °С. В контексте рефрижераторов охлаждение ТОТЭ обеспечивается утилизацией сбросной тепловой энергии через контур охлаждения к абсорбционной холодильной машине (АБХМ) для производства холода (рис. 1).

Целесообразность утилизации сбросной теплоты ТОТЭ к АБХМ при рефрижераторных перевозках автотранспортом изучена и подтверждена [5]. Объемы энергии холода, производимого системой охлаждения блока, достаточно для окупаемости работы малогабаритной установки (табл. 2).

Работа установки исключает прямые выбросы оксидов серы и монооксида углерода,

ТАБЛИЦА 2. Основные показатели установки ТОТЭ-АБХМ

Объем холодильника	Холодопроизводительность (кВт)	Количество ячеек (шт.)	Номинальная мощность блока (кВт)	Цена когенерации (руб./кВт·ч)	Эффективность когенерации (%)
Малый	1	80	3,3	12	46,21
Средний	4	285	12,8	11	46,21
Большой	6	440	18,7	10	46,21
Эквивалентные выбросы CO <sub>2</sub> при сжигании синтез-газа					
Плотность тока 0,1 А/см <sup>2</sup>		Плотность тока 1,4 А/см <sup>2</sup>		Вес энергоустановки: 62 кг на 100 ячеек Стоимость: 170 тыс. руб. за 1 кВт	
0,38 кг/ кВт·ч		0,82 кг/ кВт·ч			

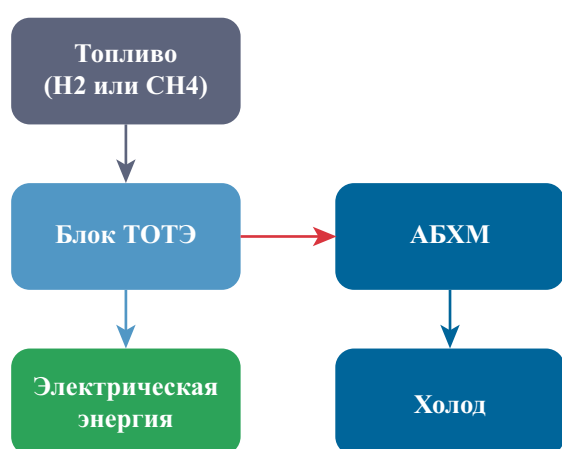


Рис. 1. Функциональная схема установки ТОТЭ-АБХМ

однако остаются косвенные выбросы парниковых газов, неизбежные при производстве топливных элементов.

Передаваемой от ТОТЭ к АБХМ энергии достаточно для резервного холодоснабжения в случае выхода из строя основной установки рефконтейнера. Потенциал ТОТЭ дополнительно раскрывается при оснащении установок литийионными аккумуляторами для обеспечения бесперебойного питания и с интеграцией умных сетей: модульная компоновка топливных элементов повышает надежность системы электропитания и эффективность распределения ресурсов благодаря вычислительному модулю.

### Энергоустановка со сжиганием СПГ

Второй источник энергии — сжиженный природный газ, в первую очередь за счет государственной ориентации на увеличение его производства [6]. В 2022 году выпуск СПГ в Российской Федерации достиг 32,5 млн т. К 2035 году поставлена цель нарастить производство до 120–140 млн т в год [7]. С развитием инфраструктуры открывается возможность по переходу от дизельных дженсетов к газовым с использованием СПГ.

Сжигание СПГ в установках малой мощности исключает выбросы серы и твердых частиц, снижая экологическую нагрузку на окружающую среду [8]. Кроме потенциала углеродного топлива, в СПГ хранится запас энергии, накопленный в процессе сжижения. Затраты энергии  $W$  для сжижения СПГ, представляемые как термомеханическая эксергия, или эксергия холода, оцениваются с помощью формулы:

$$\begin{aligned}
 \delta W_{max} &= \delta q - \delta h = T_0 ds - dh \\
 e &= (h_s - h_0) + T_0 (s_0 - s_s) = \\
 &= C_p (T_s - T_0) + T_0 \int_{T_s}^{T_0} \frac{\delta q}{T} - RT_0 \int_{p_s}^{p_0} \frac{\delta p}{p} = \\
 &= C_p (T_s - T_0) + C_p T_0 \ln \frac{T_0}{T_s} - RT_0 \ln \frac{p_s}{p_0},
 \end{aligned}$$

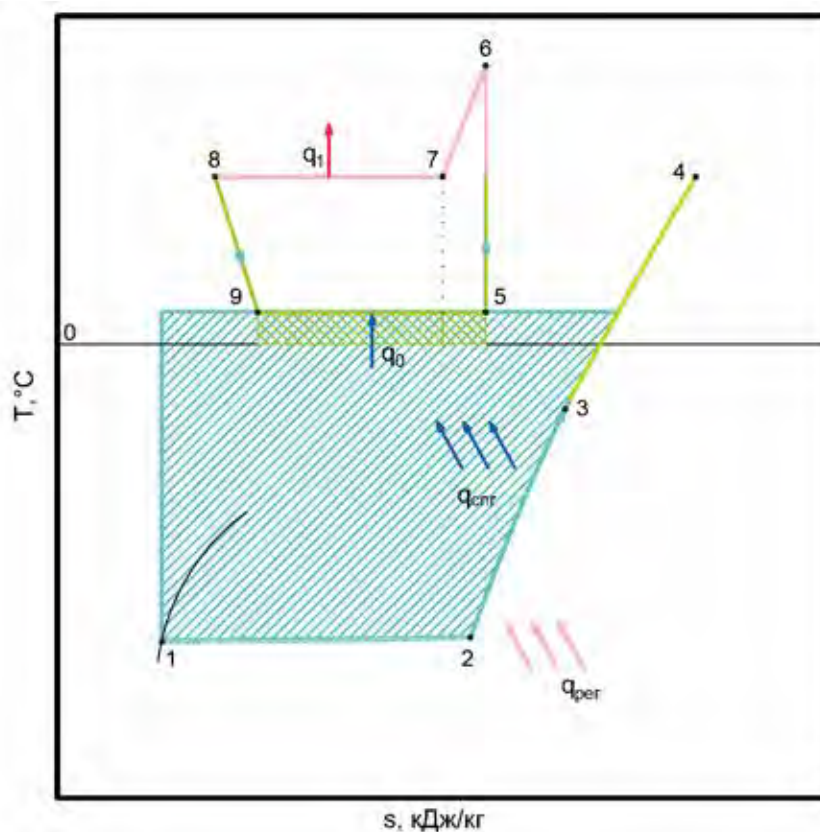
где первые два члена уравнения выражают термическую эксергию, а последний член выражает эксергию давления. При стандартных условиях  $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении  $P_0$  энтальпия метана  $h_1 = 10\text{ кДж/кг}$ ; при  $-162\text{ }^\circ\text{C}$  и 1 бар энтальпия СПГ  $h_2 = 1005\text{ кДж/кг}$ .

Часть этой эксергии можно использовать для полезной работы. Исключив эксергию давления, доступная тепловая энергия от регазификации определяется в диапазоне от 900 до 925 кДж/кг [9–10]. Сравнение холодопроизводительности регазификации от СПГ и парокомпрессионного холодильного цикла представлено на рис. 2. В процессе регазификации подогрев СПГ осуществляется за счет тепловых поступлений из рефконтейнера че-

рез теплообменник. Учитывая неизбежные потери при передаче энергии, рекуперации холода от СПГ обеспечит производство холода в объеме от 214 до 380 кДж/кг СПГ в зависимости от КПД теплообменника [11].

В работах [12–13] рассматривается эффект от протекания СПГ через теплообменники, расположенные на торцевой поверхности и под крышей. На рис. 3 представлена схема установки теплообменников в торцевой части кузова.

При расходе 5,6 кг/ч СПГ целиком заменяет холодильную установку: время снижения температуры от  $+28$  до  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  занимает 2,5 часа. Достигнутая холодопроизводительность 1,2 кВт сопоставима с мощностью авторефрижераторов, чей рабочий диапазон



**Рис. 2.** Комбинированный парокомпрессионный холодильный цикл (5–6–7–8–9) с утилизацией холода от регазифицируемого СПГ (1–2–3–4)

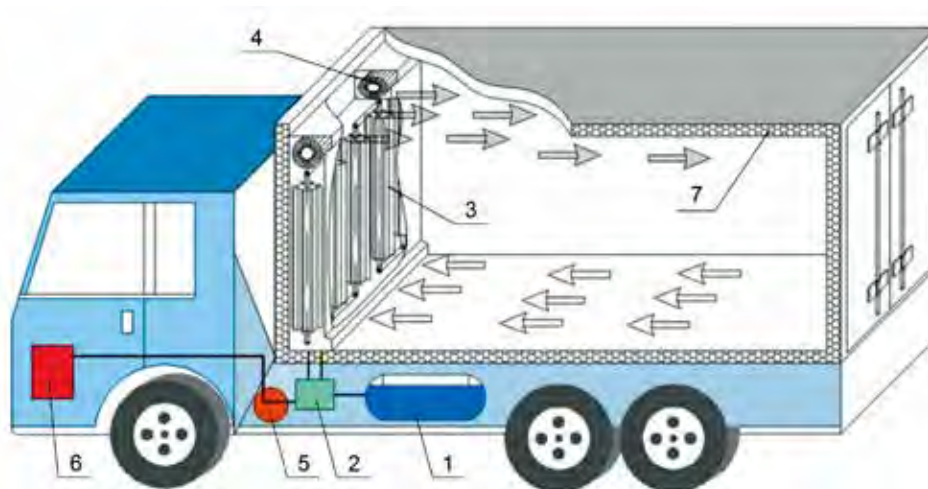


холодильных мощностей составляет от 0,8 до 3 кВт. Связь теоретического расхода СПГ с холодопроизводительностью приведена на графике (рис. 4).

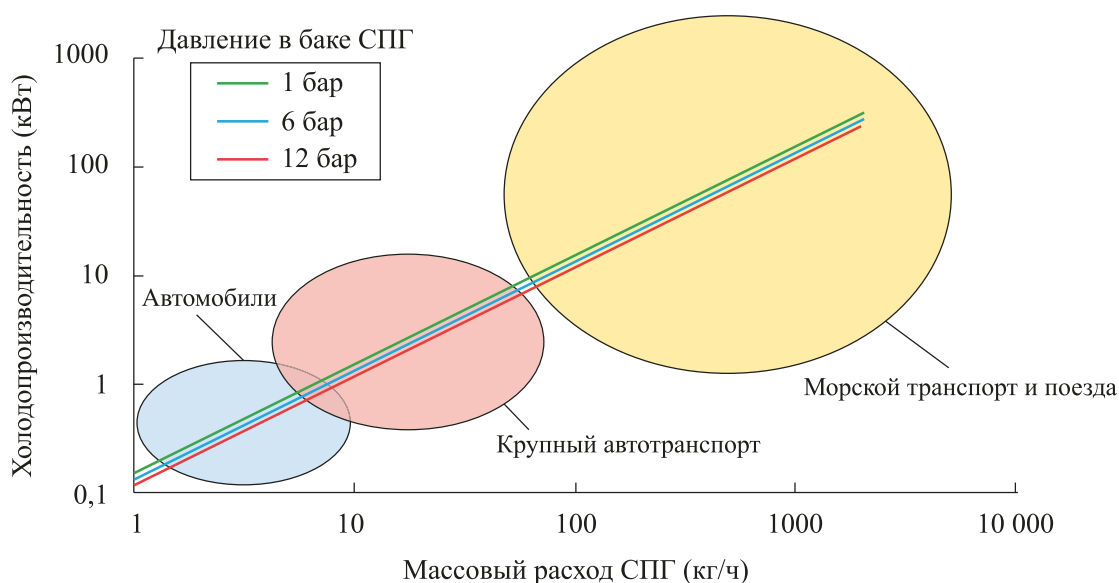
Холодильные установки для рефрижераторных контейнеров требуют мощности от 16 до 24 кВт. Состав типовой энергоустановки на СПГ приведен в табл. 3.

Как и в случае с топливными элементами, установки на СПГ способны компенсировать неучтенные тепловые поступления, а также частично заменить основную холодильную установку в аварийной ситуации.

При использовании энергоустановок указанного типа также возможно распыление криогенной жидкости непосредственно



**Рис. 3.** Принципиальная схема СПГ-авторефрижератора малой грузоподъемности: 1 — бак СПГ; 2 — газовый мультиблок; 3 — теплообменник рекуперации холодной энергии; 4 — вытяжной вентилятор; 5 — пароперегреватель; 6 — двигатель; 7 — холодильная камера



**Рис. 4.** Холодопроизводительность СПГ в зависимости от массового расхода топлива

в камеру с грузом без достижения взрывоопасной концентрации метана. Необходимо отметить, что выбросы  $\text{CO}_2$  при распылении соответствуют выбросами от прямого сжигания СПГ или дизельного топлива стандарта ДТ «Евро-5» (табл. 4).

ТАБЛИЦА 3. Технические характеристики СПГ-энергоустановки

Оборудование / характеристика	Значение
<b>1. Генератор (ФАС-18-1/ВР)</b>	
Номинальная мощность, кВт	18
Расход газа (плотность 0,42 кг/м <sup>3</sup> ), л/ч	11,1
Масса генератора, кг	530
<b>2. Криобак (LNG530L, СТФК «КамАЗ»)</b>	
Объем, л	530
Снаряженная масса, кг	~ 300
Рабочее давление, МПа	1,6
<b>3. Газовый мультиблок</b>	
Рабочее давление на входе, МПа	до 40
Давление на выходе, МПа	до 3,5
Рабочая температура, °С	285

ТАБЛИЦА 4. Техничко-экономическое сравнение ДТ и СПГ

Характеристика	ДТ «Евро-5»	СПГ
Удельная теплота сгорания, кДж/кг	42 700	48 500
Доля содержания углерода	0,875	0,75
Расход, л/ч	3,5	11,1
Стоимость топлива, руб./л	55,0	14,7
Расчет затрат на 1 час работы, руб./ч	192,5	163,2
Холодопроизводительность, кДж/л	–	от 94,0 до 373,5
Выбросы $\text{CO}_2$	708 г/кВт	696 г/кВт

## Выводы

Перехода от дизельного топлива на ТОТЭ возможен при условии дальнейшего развития водородной энергетики и удешевления производства электрохимических устройств на основе твердотопливных элементов. Тем не менее уже сейчас автономные установки ТОТЭ открывают опции по ресурсосбережению и повышению экологической безопасности перевозок там, где необходимы компактные решения и надежное электро- и холодоснабжение в целях сохранности термочувствительных грузов.

В рамках перехода к декарбонизированному производству энергии традиционные дизельные энергетические системы могут быть заменены промежуточными, экологически безопасными и экономически целесообразными альтернативами, такими как СПГ. Холодильный потенциал от регазификации СПГ позволит избежать перерасхода энергии и косвенных выбросов, связанных с перепроизводством с целью компенсации потери продуктов во время перевозки.

## Библиографический список

- Bergeret P. The future of food and agriculture: Trends and challenges [Note de lecture] // Bibliographic prospective. 2017. No. 29/09. P. 3.
- Постановление Российской Федерации от 26 июля 2021 г. № 1267 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 6 апреля 2019 г. № 406» [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202107260038> (дата обращения: 27.09.2023).
- Боровикова М.С. Организация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте: учебник. М.: Издательский дом «Автограф», 2014. 368 с.

4. Жузев А., Тертышников М. В. Топливные элементы: состояние и перспективы // Энергетика Тюменского региона. 2002. № 3. С. 170.
5. Pandya B., El-Kharouf A., Venkataraman V., et al. Comparative study of solid oxide fuel cell coupled absorption refrigeration system for green and sustainable refrigerated transportation // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 179. P. 115597.
6. Динамика промышленного производства в 2022 году [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/196621> (дата обращения: 27.09.2023).
7. Владимир Путин: «Рассчитываем к 2035 году выйти на уровень производства СПГ в 120–140 миллионов тонн в год» [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/15959> (дата обращения: 27.09.2023).
8. Колин С. А. К вопросу оценки экономических издержек от загрязнения воздуха городским транспортом (на примере Санкт-Петербурга) / С. А. Колин, С. Е. Кондратенко, Н. А. Бортников // Газовая промышленность. 2021. № 6. С. 98–104.
9. Киселев И. Г., Комиссаров С. Б., Монастырский Д. Я. О целесообразности использования сжиженного природного газа на рефрижераторных контейнерах с навесными дизель-генераторами // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 104–113.
10. Gerasimov V. E., Kuz'menko I. F., Pere-del'skii V. A., et al. Introduction of technologies and equipment for production, storage, transportation, and use of LNG // Chemical and petroleum engineering. 2004. Т. 40. № 1–2. P. 31–35.
11. Dorosz P., Wojcieszak P., Malecha Z. Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold exergy recovery systems for transportation / P. Dorosz, P. Wojcieszak, Z. Malecha // Entropy. 2018. Т. 20. № 1. С. 59.
12. Tan H., Li Y., Tuo H., et al. Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle // Energy. 2010. Т. 35. № 5. P. 1927–1935.
13. Wang F., Li M., Zhang Y., et al. Study on roof-mounted radiant cooling system for LNG-fueled refrigerated vehicles // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2021. Т. 16. № 2. P. 268–274.

Дата поступления: 30.11.2023

Решение о публикации: 13.11.2024

**Контактная информация:**

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич — докт. техн. наук, профессор; [toe@pgups.ru](mailto:toe@pgups.ru)

КОМИССАРОВ Сергей Борисович — канд. техн. наук; [s.b.komissarov@gmail.com](mailto:s.b.komissarov@gmail.com)

МОНАСТЫРСКИЙ Дмитрий Ярославович — аспирант; [monastyrskiy.dy@mail.ru](mailto:monastyrskiy.dy@mail.ru)

## Alternative energy sources for transporting thermosensitive goods in autonomous refrigerated containers

I. G. Kiselev, S. B. Komissarov, D. Ya. Monastyrsky

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

**For citation:** Kiselev I. G., Komissarov S. B., Monastyrsky D. Ya. Alternative energy sources for transporting thermosensitive goods in autonomous refrigerated containers // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 229–237. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237

### Abstract

**Purpose:** to consider the main problems of transportation of temperature-sensitive cargoes in refrigerated containers (refcontainers). To show the possibilities of transportation optimization through the introduction of alternative energy sources. **Methods:** comparison of technical and economic indicators of diesel, hydrogen and hydrogen plants is carried out. The exergetic method of estimating the effect of replacing diesel fuel with LNG was applied. **Results:** the article defines the peculiarities of cargo transportation in containers with built-in refrigeration units — autonomous refcontainers. Classification of existing energy units for power supply of refcontainers is given. The design of an autonomous installation for power supply of refcontainers is described. Environmentally safe alternatives for providing autonomous power supply of refrigerating units of refrigeration containers are proposed. The advantages of autonomous power supply based on high-temperature fuel cells are presented. An autonomous power unit with liquefied natural gas (LNG) as fuel is described. The feasibility of utilization of cold from LNG regasification is analyzed in order to ensure the stability of refcontainer operation. The estimation of the expected effect from the use of alternative fuels for autonomous power supply is made. **Practical significance:** the obtained results can be used for modernization of low-capacity power plants used in refrigerated and other types of transport.

**Keywords:** autonomous power units, high-temperature fuel cells, liquefied natural gas, refrigerated transport, autonomous refcontainers.

### References

1. Bergeret P. The future of food and agriculture: Trends and challenges [Note de lecture] // Bibliographie prospective. 2017. No. 29/09. P. 3.
2. Postanovlenie Rossijskoj Federacii ot 26 ijulja 2021 g. № 1267 “O vnesenii izmenenij v postanovlenie Pravitel’stva Rossijskoj Federacii ot 6 aprelja 2019 g. № 406” [Elektronnyj resurs]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202107260038> (data obrashhenija: 27.09.2023). (In Russian)
3. Borovikova M. S. Organizacija perevozochnogo processa na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik. M.: Izdatel’skij dom “Avtograf”, 2014. 368 s. (In Russian)
4. Zhuzev A., Tertyshnikov M. V. Toplivnye jelementy : sostojanie i perspektivy // Jenergetika Tjumenskogo regiona. 2002. № 3. S. 170. (In Russian)
5. Pandya B., El-Kharouf A., Venkataraman V., et al. Comparative study of solid oxide fuel cell coupled absorption refrigeration system for green and sustainable refrigerated transportation // Applied Thermal Engineering. 2020. T. 179. P. 115597.
6. Dinamika promyshlennogo proizvodstva v 2022 godu [Elektronnyj resurs]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/196621> (data obrashhenija: 27.09.2023). (In Russian)
7. Vladimir Putin: “Rasschityvaem k 2035 godu vyjti na uroven’ proizvodstva SPG v 120–140 millionov tonn

v god” [Elektronnyj resurs]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/15959> (data obrashhenija: 27.09.2023). (In Russian)

8. Kolin S. A. K voprosu ocenki jekonomicheskikh izderzhok ot zagrjaznenija vozduha gorodskim transportom (na primere Sankt-Peterburga) / S.A. Kolin, S. E. Kondratenko, N. A. Bortnikov // *Gazovaja promyshlennost’*. 2021. № 6. S. 98–104. (In Russian)

9. Kiselev I. G., Komissarov S. B., Monastyrskij D. Ja. O celesoobraznosti ispol’zovanija szhizhenogo prirodno go gaza na refrizheratornyh kontejnerah s navesnymi dizel’-generatorami // *Bjulleten’ rezul’tatov nauchnyh issledovanij*. 2021. № 4. S. 104–113. (In Russian)

10. Gerasimov V. E., Kuz’menko I. F., Pere-del’skii V. A., et al. Introduction of technologies and equipment for production, storage, transportation, and use of LNG // *Chemical and petroleum engineering*. 2004. T. 40. № 1–2. P. 31–35.

11. Dorosz P., Wojcieszak P., Malecha Z. Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold

exergy recovery systems for transportation // *Entropy*. 2018. T. 20. № 1. S. 59.

12. Tan H., Li Y., Tuo H., et al. Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of Liquefied Natural Gas (LNG) refrigerated vehicle // *Energy*. 2010. T. 35. № 5. P. 1927–1935.

13. Wang F., Li M., Zhang Y., et al. Study on roof-mounted radiant cooling system for LNG-fueled refrigerated vehicles // *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2021. T. 16. № 2. P. 268–274.

Received: 30.11.2023

Accepted: 13.11.2024

**Author’s information:**

Igor’ G. KISELEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; [toe@pgups.ru](mailto:toe@pgups.ru);

Sergej B. KOMISSAROV — PhD in Engineering; [s.b.komissarov@gmail.com](mailto:s.b.komissarov@gmail.com);

Dmitrij Ya. MONASTYRSKIJ — Postgraduate Student; [monastyrskiy.dy@mail.ru](mailto:monastyrskiy.dy@mail.ru)

УДК 624.21.055:693.5

## К оценке технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов

У. З. Шермухамедов<sup>1</sup>, А. А. Белый<sup>1, 2</sup>, М. М. Собирова<sup>1</sup>, Ш. Ш. Кадилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100167, Ташкент, Темирийулчилар, 1

<sup>2</sup> ООО «К2 Инжиниринг», Россия, 123290, Москва, ул. Горбунова, 2, стр. 3

**Для цитирования:** Шермухамедов У. З., Белый А. А., Собирова М. М., Кадилова Ш. Ш. К оценке технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 238–251. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-238-251

### Аннотация

**Цель:** рассмотреть вопрос об оценке технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов. Изучить технические паспорта порядка 300 железобетонных мостовых сооружений Ташкента. Детально проанализировать и сформулировать основные технико-эксплуатационные показатели (ТЭП) как критерии оценки технического состояния мостовых сооружений Ташкента. **Методы:** сделаны оценки технического состояния объектов мостового парка города — абсолютные и относительные. Для этого обозначены их предназначения. **Результаты:** авторы исследования собрали статистику на базе обследования 30 городских мостовых сооружений. Установлено, что основные повреждения пролетных строений и опор железобетонных мостов и путепроводов вызваны прежде всего плохим состоянием гидроизоляции, деформационных швов и отсутствием водоотводных труб. Сформулированы основные технико-эксплуатационные показатели (ТЭП) как критерии оценки технического состояния мостовых сооружений Ташкента, такие как «безопасность и комфортность движения», «долговечность», «грузоподъемность», «пропускная способность» и «ремонтпригодность». **Практическая значимость:** с учетом специфики крупного мегаполиса управление техническим состоянием мостовых сооружений в Ташкенте представляет собой чрезвычайно ответственную и сложную задачу. Для использования в практике эксплуатации железобетонных мостовых сооружений как наиболее массовых объектов дорожно-транспортной инфраструктуры города выполнен статистический анализ. С практической точки зрения эти сведения позволят с достаточной долей вероятности обеспечить и поддерживать заданные нормативные (проектные) уровни надежности, безопасности и долговечности мостовых сооружений.

**Ключевые слова:** мосты, путепроводы, реконструкция, технико-экономические показатели, критерии оценки, несущая способность, ремонтпригодность, долговечность, интенсивность, эксплуатация, безопасность и комфортность движения, пропускная способность, грузоподъемность.

### Введение

Осуществляемые в последние годы в Республике Узбекистан (РУ) строительные работы в широких масштабах предоставляют большие возможности в развитии дорожно-транспортной инфраструктуры.

В соответствии с указом Президента Республики Узбекистана от 28.01.2022 № УП-60 началась реализация пунктов 192–197, где поставлены такие задачи, как совершенствование единой городской транспортной

системы в условиях развивающегося мегаполиса, а также модернизация межгородских маршрутных транспортных средств в целях обеспечения безопасного и удобного передвижения граждан. Исходя из поставленных целей, разработана «Программа развития автомобильных дорог», реализация которой включает в себя интеграцию единой сети автомобильных дорог, объединяющей столицу и крупные города республики. В соответствии с этой программой важное значение имеет совершенствование методов расчета поэтапной реконструкции и ремонтных работ существующих в республике 1512 мостовых сооружений с учетом строительства, реконструкции и ремонта уже существующих в Узбекистане 57,8 тыс. км автомобильных дорог [1–2].

### Постановка задачи

На сегодняшний день в Республике Узбекистан проведена инвентаризация существующих мостов, путепроводов, тоннелей

и других искусственных сооружений с целью поддержания их в необходимом состоянии, а также реализации конкретных мероприятий, включающих в себя ремонтные и иные виды реконструкции мостовых конструкций. Анализируя техническое состояние мостовых сооружений, отмечаем, что на лето 2023 года в РУ эксплуатируется 14 863 рассматриваемые конструкции, 3394 из которых не находятся на балансе соответствующих ведомственных организаций, 5550 (37%) нуждаются в ремонте и реконструкции, из них 741 находится в аварийном или предаварийном состоянии, а для 4890 сооружений необходимы ремонтные работы (рис. 1) [1–3]. Значительная часть данных объектов расположена в черте г. Ташкента, являющегося столицей и наиболее крупным городом республики. В этой связи в настоящей статье авторами проведена оценка технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов.



Рис. 1. Состояние существующих мостов в РУ

### Выбор объектов детальной оценки их технического состояния

Одним из показателей роста города и трансформации его в мегаполис является активный рост населения, что приводит к необходимости строительства объектов транспортной системы. Известно, что динамичный рост Ташкента за последние годы привел к увеличению транспортного потока в три раза, что составило более 750–800 тыс. автомобилей за сутки. На сегодняшний день в Ташкенте эксплуатируется более 250 мостовых сооружений и около 60% из них находится под надзором «Главного управления благоустройства, спецуправления по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту искусственных сооружений городов и районов», что приводит к возникновению большой нагрузки на транспортную инфраструктуру города [4, 5]. В ходе анализа эксплуатационного состояния железобетонных мостовых сооружений Ташкента, которые составляют значительное количество, они были распределены на три условные категории по времени их строительства. Таким образом, мостовые сооружения, построенные с 1892 до 1960-х годов составили первую категорию, ко второй категории относятся мостовые сооружения от 1960-х до 1990-х годов. В последнюю категорию входят конструкции с 1990-х годов XX века по настоящее время строительства.

В результате проведенного анализа выяснилось, что мостовые сооружения возведены по индивидуальным и типовым проектам. Перечень конструктивных элементов железобетонных мостов и путепроводов Ташкента, прошедших визуальное обследование, представлен в табл. 1.

Приведенные в таблице мосты и путепроводы были распределены по временной



Рис. 2. Категории и количество мостов по годам постройки

категории, исходя из даты их строительства, что позволяет говорить о том, что они были спроектированы под различные нормативные нагрузки и расположены в разных частях столицы. Это также говорит о различии в эксплуатационных условиях.

### Оценка технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов

В настоящее время в Республике Узбекистан действует инструкция ИКН-140–21 [6], в соответствии с которой выполняется техническая оценка мостов и путепроводов. Необходимо отметить, что данная инструкция предполагает оценку мостового сооружения исключительно по общему техническому состоянию, не включающему в себя отдельные немаловажные критерии. По мнению авторов статьи, это не в полной мере определяет необходимые технические показатели и является недостаточным.

Проанализировав источники российских ученых в области эксплуатации мостовых сооружений, таких как А. И. Васильев, С. А. Бокарев, В. И. Шестериков [7–9], а также нормативы Российской Федерации ОДМ 218.4.001–2008 [10], стандарты Японии,



ТАБЛИЦА 1. Краткие данные анализируемых мостовых сооружений на втором этапе

№	Наименование улицы расположения мостового сооружения	Год постройки	Год реконст- рукции	Длина / габарит	Год осмотра	Материал	Категория по годам
1	Ул. Кичик Бешёгоч (Стародубцева)	1932	2018	26,6 / 6,8	2015 г.	ж/б	I
2	Ул. Авлиё ота (Кафанова)	1933	1998	10,0/6,7	2019 г.	кирпич.	I
3	Ул. Т. Шевченко	1939	2005	33,6/10	2019 г.	ж/б	I
4	Ул. А. Темура кўчаси (Мовараунахр)	1942	1997	41,5/12,5	–	кирпич.	I
5	Ул. Навоий	1947	2006	26,5/21	2019 г.	ж/б	I
6	Ул. (КХАЙ) Асомова	1954	2006	57/13,5	1996 г.	ж/б	I
7	Ул. Асака	1956	2001	20,6/6,1	2015 г.	ж/б	I
8	Ул. Мироншох (Буденного)	1962	1998	10/6,7	2019 г.	ж/б	II
9	Ул. Бобур (Аэропорт)	1967	–	523,6/17,3	2021 г.	ж/б	II
10	Ул. Бобур	1967	–	28,2/21	–	ж/б	II
11	Ул. Бунёдкор	1971	–	137 / 28,1 + 2·5		ж/б	II
12	Ул. Беруни	1973	–	52,6 / 38 + 2·3,0	1996 г.	ж/б	II
13	Ул. А.Кадири	1974	–	176/22,0	1990 г.	ж/б	II
14	Ул. Фарход	1974	–	135/21	–	ж/б	II
15	Ул. КХАЙ (Абдурахманова)	1975	-	25/29,2	–	ж/б	II
16	Ул. Корасарой	1975	-	18,1/22,4	–	ж/б	II
17	Ул. Олтинсой (Наби-Хасанова)	1976	-	24,1/24	–	ж/б	II
18	Ул. Ахмад Дониш	1977	-	315 / 27 + 2·1,7	2004 г.	ж/б	II
19	Ул. Ойбек (метро Косманавты)	1985	-	27,0/28,0		ж/б	II
20	Ул. Корасарой	1993	-	14,3/17,1	–	ж/б	III
21	Ул. Сагбон	1994	–	9,0/17,2	–	ж/б	III
22	Ул. Бобур	1995	2000	85,1 / 13+13	–	ж/б	III
23	Ул. А. Темура (Мовараунахр)	1997		41,64/11,7	2019 г.	ж/б	III
24	Ул. А.Темур	1997	–	34,4/7,0	–	бетон	III
25	Ул. А. Дониш	1999	–	495,6 / 25,0	–	ж/б	III
26	Ул. Гавхар	2000	–	247/19	–	ж/б	III
27	Ул. КХАЙ	2001	–	45/22		ж/б	III
28	Ул. А. Кадири	2014	–	469,6/15	–	ж/б	III
29	Ул. Мукимий	2016	–	889,7/16,7	–	ж/б	III

мы в настоящем исследовании в качестве критериев оценки технического состояния эксплуатируемого сооружения будем использовать следующие предложенные технико-эксплуатационные показатели: «безопасность и комфортность движения», «долговечность», «грузоподъемность», «пропускная способность» и «ремонтпригодность» (рис. 3), которые детально анализируются ниже.

Проведенный анализ дал возможность определить число условных категорий, которое было принято равным 6, а также их наименования соответствуют [6]. Следовательно, «5» является показателем отличного состояния сооружения, «4» — конструкция имеет несущественные дефекты, «3» соответствует среднему показателю, где существуют малозначительные повреждения, «2» — есть уже значительные ухудшения технического состояния. Мостовые конструкции, получившие категорию «1», считаются опасными, соответственно, «0» — это критические мосты и путепроводы.

Анализируя факторы и воздействия, влияющие на техническое состояние эксплуатируемых сооружений в Ташкенте, авторами

зафиксировано, что существенное влияние на них оказывают природно-климатические условия окружающей среды города, что вызвано прежде всего его географическим расположением, а также техногенные факторы крупного мегаполиса. Исходя из того, что эксплуатируемые сооружения в Ташкенте имеют свою уникальность и специфические условия, рекомендуется разработка индивидуального подхода при оценке их технического состояния.

**ТЭП «Безопасность и комфортность движения».** Основным критерием этого ТЭП является оценка ровности дорожного покрытия, наличия дефектов покрытия (ям, неровностей), переломов профиля, колеиности. Степень ускорения, которое выражается в  $g$  (ускорение свободного падения), передающегося на автотранспорт, реализует преобразование от «комфортности» к «безопасности» [3, 11, 12].

В рамках настоящей работы под ТЭП «Безопасность и комфортность движения» нами подразумевается обобщающий критерий оценки технического состояния мостового сооружения, учитывающий безотказную работу конструкции, которая обес-

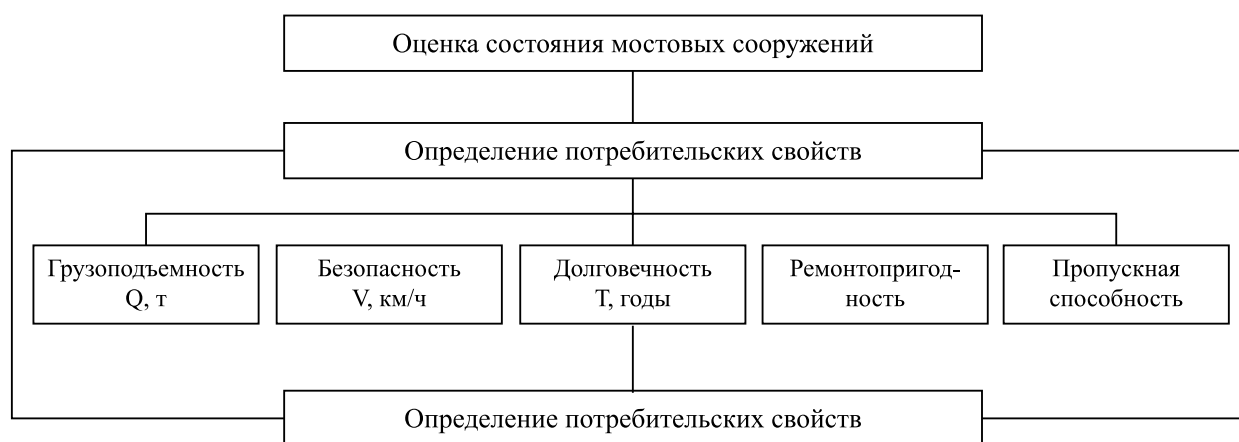


Рис. 3. Основные технико-эксплуатационные показатели



**Рис. 4.** Показатели повреждений и дефектов в элементах мостового сооружения в соответствии с ТЭП «Безопасность и комфортность движения»

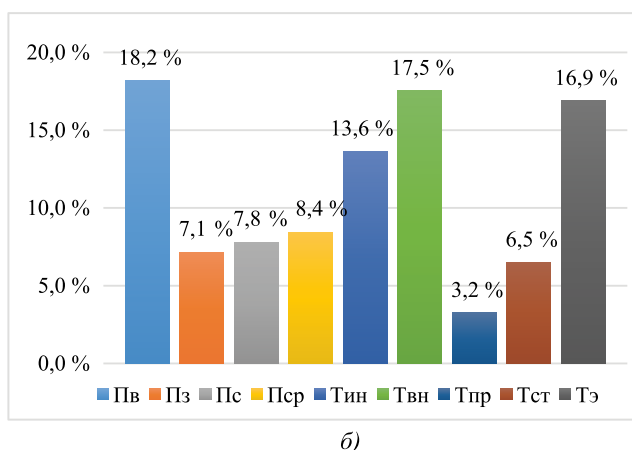
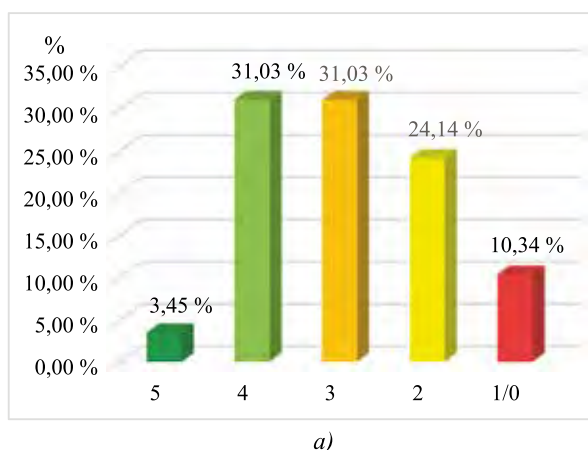
печивает безопасную скорость движения автотранспорта.

Анализ ранжирования дефектов и повреждений в соответствии с категориями приведенными и ТЭП дает показатели, отображенные на рис. 5, а. Исходя из этого, далее рассмотрим влияние негативных факторов, влияющих на мостовые сооружения данной категории (рис. 5, б).

Анализ графика, приведенного на рис. 5, а, показал, что более 65% общего количества

повреждений имеют категорию «4» и «3», что соответствует «малозначительным» и «значительным» повреждениям. Данные, приведенные на рис. 5, б, показывают, что наиболее негативным является воздействие влаги, составляющее 18,2%, далее отрицательно влияет величина временной нагрузки, которая составила 17,5%, тогда как недостаточные эксплуатационные меры в количестве 16,9% также имеют большой показатель.

**ТЭП «Долговечность».** Современные исследователи пришли к мнению, что понятие «долговечность» подразумевает срок службы сооружения до момента потери его несущей способности, который выражается в годах. Необходимо отметить, что «долговечность» подразделяется на два основных типа: физическая и моральная. Физическая долговечность является показателем ухудшения технического и эксплуатационного состояния объекта, тогда как моральное старение связано с прогнозируемыми параметрами транспортного потока автотранспорта с предложенными ТЭП. В большей степени — с ТЭП «Пропускная способность»



**Рис. 5.** Ранжирование дефектов и повреждений мостовых сооружений: а — в зависимости от категории по ТЭП «Безопасность и комфортность движения» (плотность распределения); б — влияние ТЭП «Безопасность и комфортность движения»

и «Грузоподъемность», в меньшей — с ТЭП «Безопасность и комфортность движения».

В рамках разрабатываемой методики под ТЭП «Долговечность» авторами была принята физическая долговечность мостового сооружения. Таким образом на рис. 6 показаны дефекты и повреждения по элементам конструкции, которые оказывают воздействие на ТЭП «Долговечность».

Пролетное строение мостового сооружения наиболее подвержено отрицательным

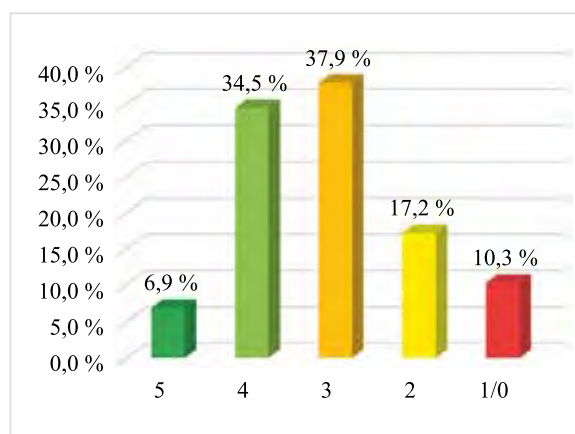


**Рис. 6.** Ранжирование дефектов и повреждений по элементам конструкций, которые оказывают влияние на ТЭП «Долговечность»

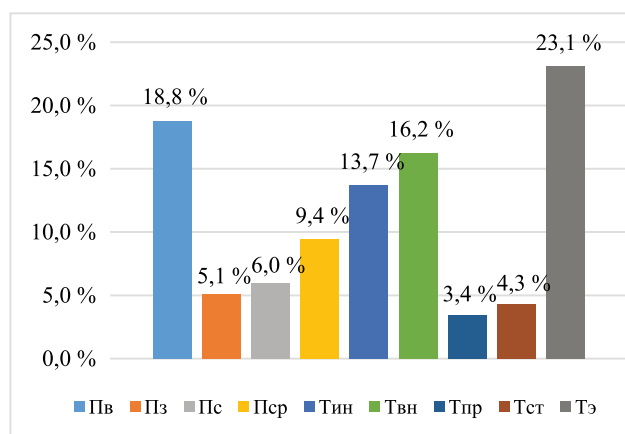
воздействиям при оценке ТЭП «Долговечность». Проведенный анализ причин распределения приведен на рис. 7, а. Данные показывают, что количество дефектов и повреждений, относящихся к категории «4» и «3», составляют около 65 % от общего количества категорий оценивания. Необходимо отметить, что такая же картина наблюдалась при оценке по ТЭП «Безопасность и комфортность движения» (рис. 7, а).

Анализ графика 7, б показал, что недостатки эксплуатации составили более 23,1 %, что говорит о несвоевременно выполненных ремонтных работах, которые не были реализованы по причине недостаточного финансирования дорожно-транспортной отрасли. Последующим высоким показателем является воздействие влаги на элементы мостового сооружения (18,8 %).

**ТЭП «Грузоподъемность».** Данный ТЭП является наиболее распространенным и описание его приведено во многих нормативных документах [6, 7, 10]. Также исследователями предлагается ограничение массы или скорости автотранспорта соответственно



а)



б)

**Рис. 7.** Распределение количества повреждений и дефектов:

а — в зависимости от категории по ТЭП «Долговечность» (плотность распределения);

б — влияние факторов на ТЭП «Долговечность»

обращающихся нагрузок, что зависит от устанавливаемой категории. Должна ограничиваться нагрузка на ось сооружения, а также общая масса автотранспорта.

В среднем около 5% мостовых сооружений г. Ташкента имеют ограничения по грузоподъемности. Данные из рис. 8 показывают, что наибольшему отрицательному воздействию подвергаются пролетные строения мостов и путепроводов, что составило 68% от общего количества элементов.



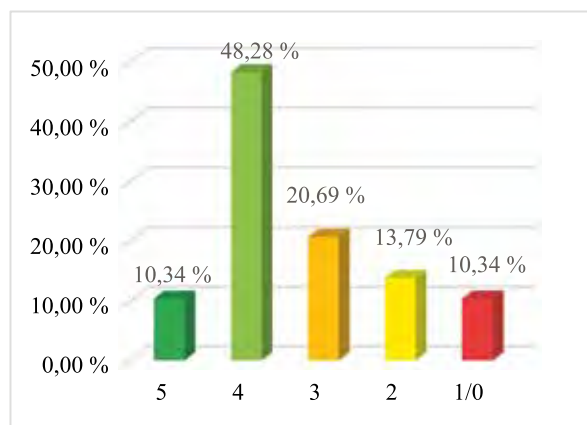
**Рис. 8.** Показатели дефектов и повреждений в соответствии с ТЭП «Грузоподъемность»

Анализ показал наличие дефектов и повреждений первой, малозначительной категории, что составило 48,3% принятой нами оценки по ТЭП «Грузоподъемность» (рис. 9, а).

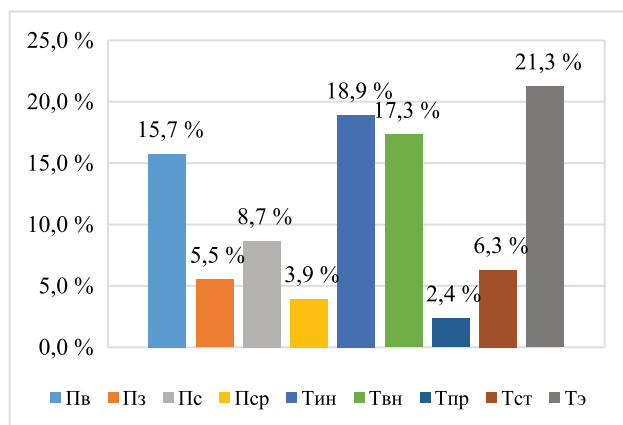
Также необходимо отметить, что анализ данных, приведенных на графике, показал наличие 24% элементов мостовых сооружений, которые были оценены в соответствии с ТЭП «Грузоподъемность» и имеют показатели «2» и «1/0», что подтверждает их опасное и критическое состояние.

Свое негативное влияние оказывает интенсивность движения автотранспортных средств (18,9%) а также наличие недостатков в эксплуатации мостового сооружения, что составило 21,3% от общего числа.

**ТЭП «Пропускная способность».** Работы различных исследователей предполагают оценку ТЭП «Пропускная способность» в зависимости от габарита проезда, однако, на наш взгляд, его следует оценивать в соответствии с показателями скорости движения автотранспортных средств по мостовому



а)



б)

**Рис. 9.** Распределение количества повреждений и дефектов:

а — в зависимости от категории по ТЭП «Грузоподъемность» (плотность распределения);  
 б — влияние факторов на ТЭП «Грузоподъемность»

сооружению, что дает нам возможность считать целесообразным введения коэффициента «К» — отношение скорости движения транспорта непосредственно по рассматриваемому объекту и магистрали, на которой он находится.

$$K = V_{ms} / V_k.$$

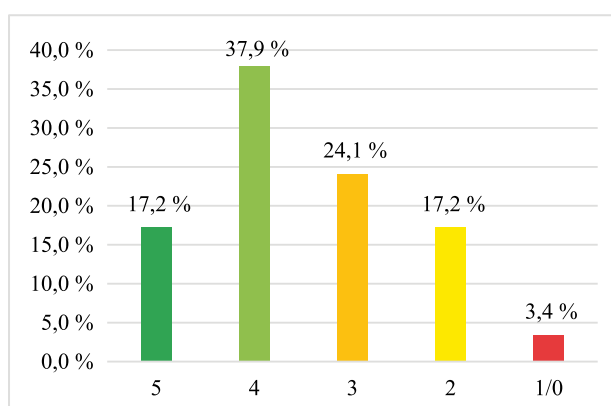
Очевидной также является связь между габаритом проезда и скоростью движения транспортного средства, однако следует учитывать, что она не всегда прямо пропорциональна [13].

Распределение дефектов и повреждений по 6 категориям по ТЭП «Пропускная способность» приведены на рис. 10, а.

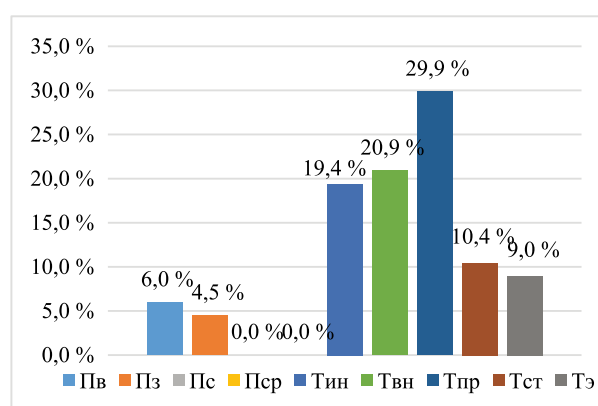
Приведенные на графике данные показывают, что наиболее отрицательное влияние по ТЭП «Пропускная способность» имеет показатель, равный 30. Это ошибки на стадии проектирования, тогда как остальные показатели значительно меньше и составляют 21 % по временным нагрузкам и интенсивности движения 19,4 %.

**ТЭП «Ремонтопригодность».** Этот показатель учитывает все аспекты, связанные с возможностью и эффективностью проведения ремонтных работ на сооружении, включая техническую осуществимость восстановления повреждений, необходимость разработки проекта для ремонта и сложность выполнения ремонтных работ. Показатель помогает определить уровень удобства и затраты ресурсов, необходимые для успешного восстановления элементов или конструкций [14, 15].

В соответствии с ТЭП «Ремонтопригодность» категория «4» подразумевает устранение в рамках работ по содержанию мостового сооружения, тогда как категория «3» говорит о сверхнормативном содержании или ремонте объекта или его элемента. При капитальном ремонте присваивается категория «2», тогда как при обнаружении нецелесообразности восстановительных работ, т.е. возникновении необходимости замены элемента конструкции, дается категория «1/0». Рис. 11 отображает данные по распределению повреждений и дефектов, которые оказывают влияние на



а)



б)

**Рис. 10.** Распределение количества повреждений и дефектов:

а — в зависимости от категории по ТЭП «Пропускная способность»

(плотность распределения); б — влияние факторов на ТЭП «Пропускная способность»



**Рис. 11.** Распределение повреждений (дефектов), оказывающих влияние на ТЭП «Ремонтопригодность», по элементам сооружения

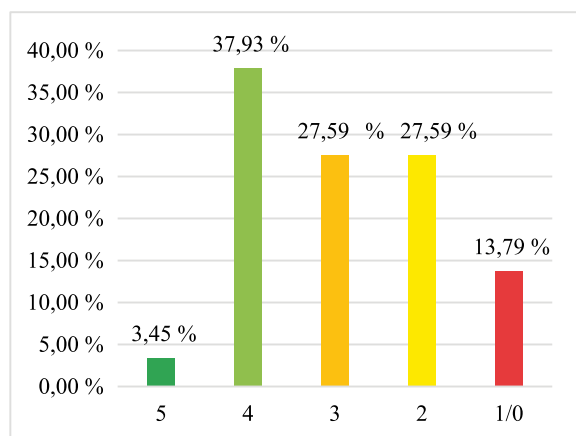
ТЭП «Ремонтопригодность» в соответствии с элементами конструкций.

Из анализа рис. 12, а видно, что доля сооружений, требующих работ по ремонту и капитальному ремонту, составляет более 54%. Это означает, что более половины сооружений нуждаются в различного рода ремонтных работах. Также можно отметить, что 13,79% со-

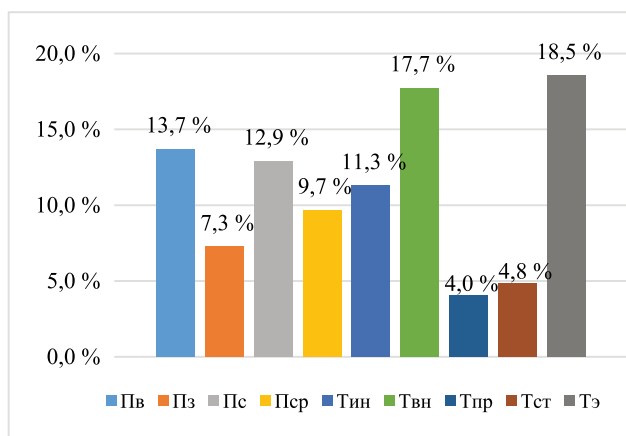
оружений относится к категории реконструкции. Это говорит о том, что часть объектов требует более серьезных изменений и модернизации [3].

Пролетное строение является наиболее подверженным воздействиям факторов суммарной оценки по всем техническим экспертизам, так как в 40% случаев на нем обнаруживаются различного рода дефекты и повреждения. Повреждения и дефекты в опорах определяются в среднем в 18% случаев, что также является значительным показателем и требует внимания при проведении ремонтных работ. Дефекты и повреждения мостового полотна составляют 42%, что указывает на необходимость уделить особое внимание состоянию мостового полотна при проведении технической экспертизы и ремонтных работ (рис. 13).

Таким образом, данные показатели позволяют определить наиболее уязвимые элементы сооружения, которые требуют особого внимания и должны стать приоритетными для проведения ремонтных мероприятий.



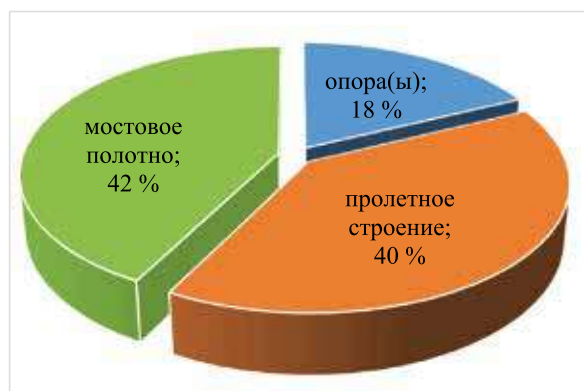
а)



б)

**Рис. 12.** Ранжирование количественного показателя повреждений и дефектов:  
 а — в зависимости от категории по ТЭП «Ремонтопригодность» (плотность распределения);  
 б — влияние факторов на ТЭП «Ремонтопригодность»

Из проведенного исследования определено, что основными факторами, снижающими уровень технического состояния конструкции мостовых сооружений, являются влажностное воздействие (18,2%), величина временной нагрузки (17,5%) и недостатки в эксплуатации (16,9%), что приведено на рис. 14.



**Рис. 13.** Суммарное распределение повреждений (дефектов), оказывающих влияние на ТЭП, по элементам сооружения

## Выводы

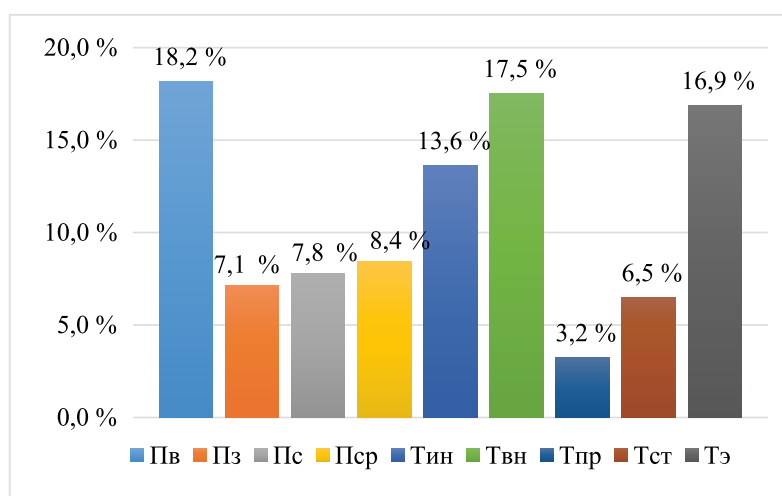
В настоящее время в Республике Узбекистан действует инструкция ИКН 140–21

для оценки технического состояния мостов и путепроводов, но данный документ имеет ряд недостатков, одним из которых является определение общих показателей объекта, а не выявление его критериев.

В ходе работы авторами были обследованы мосты и путепроводы г. Ташкента. В результате было установлено, что элементы мостовых сооружений имеют повреждения и дефекты по причине неисправных деформационных швов, плохой гидроизоляции, а также неисправности водоотводных труб.

В качестве оценки технического состояния мостов и путепроводов авторами были определены технико-эксплуатационные показатели (ТЭП), такие как «Безопасность и комфортность движения», «Долговечность», «Грузоподъемность», «Пропускная способность» и «Ремонтопригодность».

С использованием известных методов, критериев оценки и факторов воздействия на основе влияния дефектов на объект исследования была произведена детальная оценка их технического состояния.



**Рис. 14.** Суммарное влияние факторов на ТЭП при наличии повреждений



**Библиографический список**

1. Указ Президента Республики Узбекистан «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы» от 28.01.2022 № ПФ-60.

2. Исследование технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов / У. З. Шермухамедов, З. Д. Калпенова, М. М. Собирова и др. // Путевой навигатор. СПб., 2022. № 52 (78). С. 44–51.

3. Белый А. А. Методика оценки и прогнозирования технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений: дис. ... канд. техн. наук. М.: Московский государственный автомобильно-дорожный институт (Технический университет), 2009. 253 с.

4. Оценка технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений (на примере г. Ташкента) / У. З. Шермухамедов, А. А. Белый, М. М. Собирова и др. // Путевой навигатор. СПб., 2023. № 57 (83). С. 44–51.

5. Байбулатов Х. А., Бердиаев М. Ж. Автомобиль йўлларининг темирбетон кўприкларини юк кўтариш қобилияти ва узокқа чидамлилигини ошириш муаммолари // Проблемы механики. Ташкент, 2018. № 3. С. 80–82.

6. ИҚН 140–21. «Автомобиль йўлларидаги кўприк иншоотларини диагностика, текшириш таркиби ва ўтказилиш тартиби бўйича йўриқнома».

7. Бокарев С. А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий. Новосибирск: МПС РФ, СГУПС, 2002. 276 с.

8. Васильев А. И. Вероятностная оценка остаточного ресурса физического срока службы железобетонных мостов // Вопросы нормирования потребительских свойств мостов. М.: ОАО «ЦНИИС», 2002. С. 101–23.

9. Шестериков В. И. Оценка долговечности мостов с различными конструкциями пролетных

строений // Сб. трудов НПО «РосдорНИИ», вып. 6. М.: Информавтодор, 1993. С. 157–167.

10. ОДМ 218.4.001–2008

11. Белый А. А. Анализ технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. № 3. Белгород: РИЦ БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. С. 37–44. DOI: 10.12737/24624.

12. Белый А. А. Способ оценки технического состояния железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга // Транспортное строительство. 2009. № 6. С. 10–13.

13. Вдовенко А. В., Бегун С. Е., Кулиш В. И. Сервис и мониторинг дорожных сооружений. Хабаровск: ХабГТУ, 2002. 692 с.

14. Белый А. А. Методика оценки и прогнозирования технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений: дис. ... канд. техн. наук. М.: Московский государственный автомобильно-дорожный институт (Технический университет), 2009. 253 с.

Дата поступления: 12.01.2024

Решение о публикации: 27.02.2024

**Контактная информация:**

ШЕРМУХАМЕДОВ Улугбек Забихуллаевич — докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Мосты и тоннели»; ulugbekjuve@mail.ru

БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели»; andbeliy@mail.ru

СОБИРОВА Маъмура Мирабдулла кизи — аспирант кафедры «Мосты и тоннели»; mamura\_9105@bk.ru

КАДИРОВА Шарофат Шавкатовна — ассистент кафедры «Мосты и тоннели»; irana\_scorpion@mail.ru

## To assess the technical and operational condition of urban reinforced concrete bridges and overpasses

U. Z. Shermukhamedov<sup>1</sup>, A. A. Belyi<sup>1, 2</sup>, M. M. Sobirova<sup>1</sup>, Sh. Sh. Kadirova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tashkent State Transport University, 1, Temiryulchilar, Tashkent, 100167, Uzbekistan

<sup>2</sup> K2 Engineering LLC, 2, p. 3., Gorbunova str., Moscow, 123290, Russia

**For citation:** *Shermukhamedov U. Z., Bely A. A., Sobirova M. M. Kadirova Sh. Sh.* To assess the technical and operational condition of urban reinforced concrete bridges and overpasses // *Izvestia of the St. Petersburg State University of Railway Engineering*. St. Petersburg: PGUPS, 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 238–251. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-238-251

### Abstract

**Objective:** to consider the issue of assessing the technical and operational condition of urban reinforced concrete bridges and overpasses. Study technical passports of about 300 reinforced concrete bridge structures in Tashkent. Analyze in detail and formulate the main technical and operational indicators (TEI) as criteria for assessing the technical condition of bridge structures in Tashkent. **Methods:** methods for assessing the technical condition of the city's bridge park objects have been determined — absolute and relative. For this purpose their purposes are indicated. **Results:** the statistics were compiled on the basis of the bridge park of the city of Tashkent, carried out by the authors of a survey of 30 city bridge structures. Based on the results of the examination of selected bridge structures, it was established that the main damage to the spans and supports of reinforced concrete bridges and overpasses is caused, first of all, by the poor condition of waterproofing, expansion joints and lack of water water pipes. The main technical and operational indicators (TEI) are formulated as criteria for assessing the technical condition of bridge structures in Tashkent, such as “safety and traffic comfort”, “durability”, “load capacity”, “throughput”, and “maintainability”. **Practical importance:** taking into account the specifics of a large metropolis, managing the technical condition of bridge structures in Tashkent is an extremely responsible and complex task. For use in practical operation of reinforced concrete bridge structures as the most widespread objects of the city's road transport infrastructure, a statistical analysis was performed. From a practical point of view, this information will make it possible with a sufficient degree of probability to ensure and maintain the specified regulatory (design) levels of reliability, safety and durability of bridge structures.

**Keywords:** bridges, overpasses, reconstruction, technical and economic indicators, evaluation criteria, load-bearing capacity, maintainability, durability, intensity, operation, traffic safety and comfort, throughput, load capacity.

### References

1. Ukaz Prezidenta Respubliki Uzbekistan “O Strategii razvitija novogo Uzbekistana na 2022–2026 gody” ot 28.01.2022 № PF-60. (In Russian)
2. Issledovanie tehniko-jekspluacionnogo sostojanija gorodskih zhelezobetonnyh mostov i puteprovodov / U. Z. Shermuhamedov, Z. D. Kalpenova, M. M. Sobirova i dr. // *Putevoj navigator*. SPb., 2022. № 52 (78). S. 44–51. (In Russian)
3. Belyj A. A. Metodika ocenki i prognozirovanija tehničeskogo sostojanija gorodskih zhelezobetonnyh mostovyh sooruzhenij: dis. ... kand. tehn. nauk. M.: Moskovskij gosudarstvennyj avtomobil'no-dorozhnyj institut (Tehničeskij universitet), 2009. 253 s. (In Russian)
4. Ocenka tehničeskogo sostojanija gorodskih zhelezobetonnyh mostovyh sooruzhenij (na primere g. Tashkenta) / U. Z. Shermuhamedov, A. A. Belyj,

M. M. Sobirova i dr. // Putevoj navigator. SPb., 2023. № 57 (83). S. 44–51. (In Russian)

5. Bajbulatov H. A., Berdiaev M. Zh. Avtomobil' jyllarining temirbeton kypriklarini juk kytarish kobilijati va uzokqa chidamliligini oshirish muammolari // Problemy mehaniki. Tashkent, 2018. № 3. S. 80–82. (In Russian)

6. IKN 140–21. "Avtomobil' jyllaridagi kyprik inshootlarini diagnostika, tekshirish tarkibi va ytkazilish tartibi bjjicha jyrknoma". (In Russian)

7. Bokarev S. A. Upravlenie tehničeskim sostojaniem iskusstvennyh sooruzhenij zheleznyh dorog Rossii na osnove novyh informacionnyh tehnologij. Novosibirsk: MPS RF, SGUPS, 2002. 276 s. (In Russian)

8. Vasil'ev A. I. Verojatnostnaja ocenka ostatochnogo resursa fizicheskogo sroka sluzhby zhelezobetonnyh mostov // Voprosy normirovanija potrebitel'skih svojstv mostov. M.: OAO "CNIIS", 2002. S. 101–23. (In Russian)

9. Shesterikov V. I. Ocenka dolgovechnosti mostov s razlichnymi konstrukcijami proletnyh stroenij // Sb. trudov NPO "RosdorNII", vyp. 6. M.: Informavtodor, 1993. S. 157–167. (In Russian)

10. ODM 218.4.001–2008 (In Russian)

11. Belyj A. A. Analiz tehničeskogo sostojanija jeksploatiruemyh zhelezobetonnyh mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga // Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova, 2017. № 3. Belgorod: RIC BGTU im. V. G. Shuhova, 2017. S. 37–44. DOI: 10.12737/24624. (In Russian)

12. Belyj A. A. Sposob ocenki tehničeskogo sostojanija zhelezobetonnyh mostov i puteprovodov Sankt-Peterburga // Transportnoe stroitel'stvo. 2009. № 6. S. 10–13. (In Russian)

13. Vdovenko A. V., Begun S. E., Kulish V. I. Servis i monitoring dorozhnyh sooruzhenij. Habarovsk: HabGTU, 2002. 692 s. (In Russian)

14. Belyj A. A. Metodika ocenki i prognozirovaniya tehničeskogo sostojanija gorodskih zhelezobetonnyh mostovyh sooruzhenij: dis. ... kand. tehn. nauk. M.: Moskovskij gosudarstvennyj avtomobil'no-dorozhnyj institut (Tehničeskij universitet), 2009. 253 s. (In Russian)

Received: 12.01.2024

Accepted: 27.02.2024

**Author's information:**

Ulugbek Z. SHERMUKHAMEDOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ulugbekjuve@mail.ru

Andrei A. BELYI — PhD in Engineering, Associate Professor; andbeliy@mail.ru

Mamura M. SOBIROVA — Postgraduate Student; mamura\_9105@bk.ru

Sharofat Sh. KADIROVA — Assistant;

irana\_skorpion@mail.ru

(Tashkent state transport university)

УДК 629.423.1

## Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения

П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова

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

**Для цитирования:** Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения / Григоренко П. В., Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Самойлова А. С. // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264

### Аннотация

**Цель:** разработать способ повышения качества электроэнергии на токоприемнике электровоза переменного тока при его работе на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения с транзисторными тяговыми преобразователями. **Методы:** проанализированы электромагнитные процессы на токоприемнике и в силовой цепи электровоза переменного тока с тиристорными и транзисторными тяговыми преобразователями, произведено их сравнение по критерию искажения качества электроэнергии на токоприемнике. Проанализированы электромагнитные процессы на токоприемнике и в силовой цепи электровоза переменного тока с транзисторными тяговыми преобразователями, работающими по предложенному способу — разнесенного управления. **Результаты:** выявлены причины колебаний напряжения и тока на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными тяговыми преобразователями на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения. Разработан способ разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями, позволяющий снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих тока и напряжения на токоприемнике электровоза переменного тока. **Практическая значимость:** разработанный способ разнесенного управления может применяться на электровозах переменного тока после их переоборудования на транзисторные тяговые преобразователи, а также при проектировании новых электровозов.

**Ключевые слова:** электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, коллекторный электропривод, IGBT-транзисторы, качество электрической энергии, энергоэффективность.

### Введение

Перейти на опережающее развитие железных дорог Восточного полигона — поручение Президента Российской Федерации по итогам совещания развития отдельных направлений транспортного комплекса [1]. Бессветофорное интервальное регулирование движения поездов признается ведущей технологией, которая позволит исполнить по-

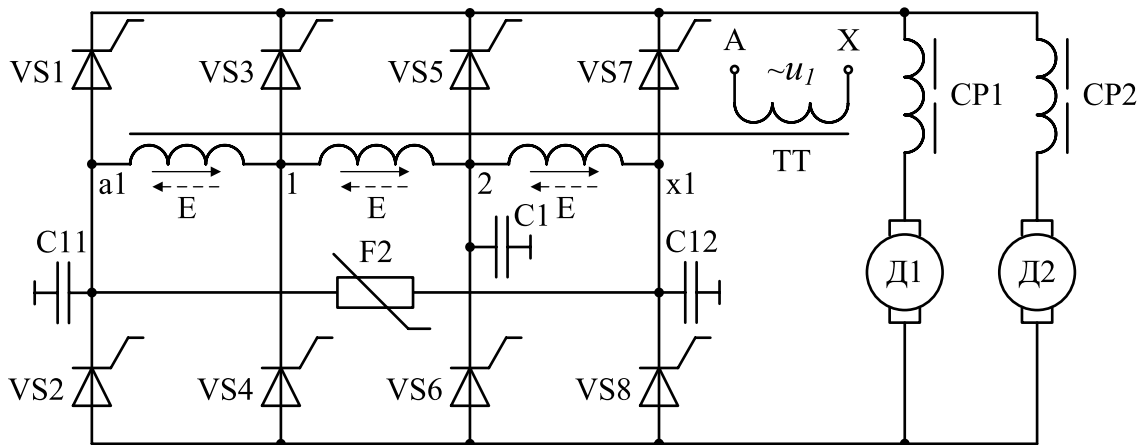
ручение Президента Российской Федерации и повысить пропускную способность Транссиба и БАМа [2]. Технологии «Подвижные блок-участки» и «Виртуальная сцепка», разработанные АО НИИАС, ведущим институтом холдинга «РЖД», уже позволили увеличить пропускную способность тяговых участков за счет сокращения межпоездного

интервала [3–5]. Однако для дальнейшего, более эффективного использования разработанных технологий необходимо повышать энергетические показатели электровазов переменного тока с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП), которые потребляют значительное количество реактивной энергии из сети (коэффициент мощности электроваза переменного тока не превышает 0,84) [6–8]. Становление новых технологий интервального регулирования движения поездов не может показать свою полную эффективность по причине низкой энергоэффективности электровазов с тиристорными ВИП, поэтому необходимо внедрять новые технологии и на электроподвижном составе. Для электровазов переменного тока авторами предложен ВИП с управляемыми полупроводниковыми приборами — IGBT-транзисторами. Использование транзисторного ВИП для коллекторного электропривода электроваза позволит значительно увеличить коэффициент его мощности на высших зонах регулирования на 15–40%, а на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения — до 90% [9–13]. В результате электровазы переменного тока с транзисторными ВИП при их внедрении позволят значительно улучшить движение поездов по технологиям интервального регулирования и повысить пропускную способность железных дорог Восточного полигона за счет снижения реактивной мощности в тяговой сети, что даст возможность использовать больше активной мощности на тягу поездов другими локомотивами, находящимися на одной фидерной зоне. Это, в свою очередь, позволит еще больше снизить межпоездной интервал времени.

Однако еще остается вопрос соблюдения требований государственного стандарта,

регулирующего нормы качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения общего назначения, к которым относится железная дорога [14]. С увеличением количества электровазов на одной фидерной зоне увеличивается искажение питающего напряжения в тяговой сети и снижается его среднеквадратическое значение, что негативно влияет на работу электрического и электронного оборудования электроваза, снижая их ресурс. Поэтому необходимо стремиться, чтобы каждый электроваз вносил наименьшие искажения в тяговую сеть.

Известно, что тиристорный ВИП (рис. 1) с типовым алгоритмом работы (табл. 1) на первой зоне регулирования имеет низкий коэффициент мощности (в среднем 0,49 на 0,5 зоны регулирования). Машинисты магистральных грузовых электровазов утверждают, что работа на первой зоне в режиме тяги составляет в среднем 20% от всего времени работы электроваза, что составляет значительное время. Такое положение дел препятствует дальнейшему сокращению времени между поездами при их вождении по технологии «Виртуальная сцепка». Хотя и коэффициент гармонических составляющих напряжения на токоприемнике при работе на первой зоне регулирования составляет всего 3–4% [15], что является допустимым по ГОСТ 32144-2013. Это объясняется незначительным изменением индуктивного сопротивления электроваза относительно тяговой сети в моменты коммутации из-за того, что в образовании первой зоны задействована только одна секция тяговой обмотки тягового трансформатора электроваза 1–2 (рис. 1) [16–17]. Основное искажение питающего напряжения происходит в момент фазовой коммутации, которое тем больше, чем ближе момент коммутации



**Рис. 1.** Упрощенная принципиальная схема силовой цепи электровоза переменного тока с штатным тиристорным ВИП:

*TT* — тяговый трансформатор; *A-X* — выводы первичной обмотки *TT*;  
 $\sim u_1$  — напряжение *A-X*; *a1-1-2* — выводы вторичной обмотки *TT* на 315 В;  
*2-x1* — вывод вторичной обмотки *TT* на 630 В; *VS1-VS8* — тиристорные плечи;  
*CP1, CP2* — сглаживающие реакторы; *D1, D2* — тяговые двигатели;  
*E* — ЭДС вторичных обмоток *TT*

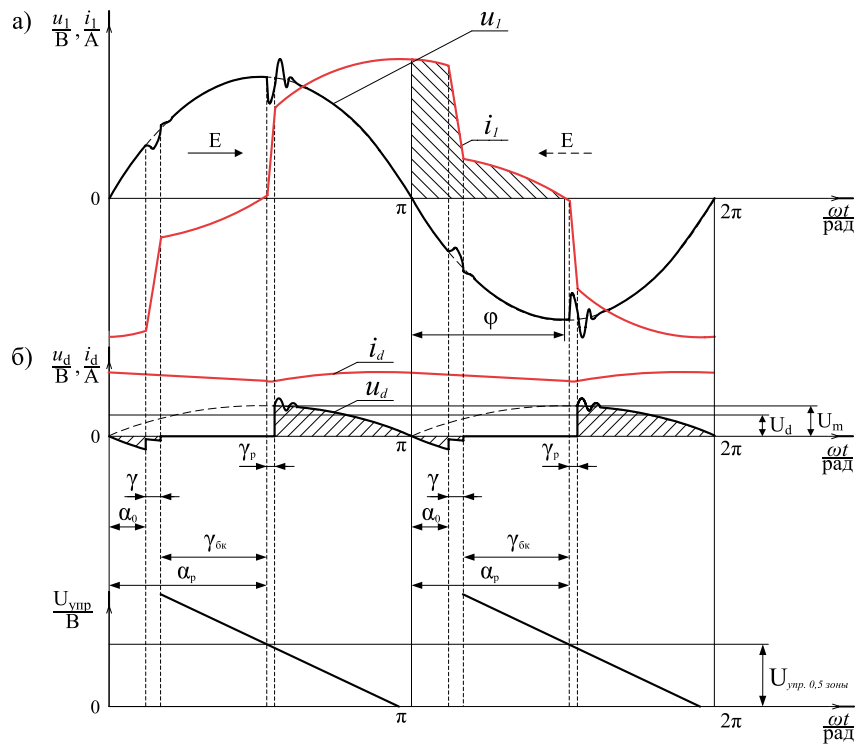
ТАБЛИЦА 1. Типовой алгоритм управления тиристорами плеч штатного ВИП электровоза переменного тока

Номер зоны	Полупериод	Алгоритм подачи импульсов на тиристоры плеч ВИП							
		Плечи ВИП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
I	→				$\alpha_p$	$\alpha_0 \alpha_p$			
	←			$\alpha_0$				$\alpha_p$	

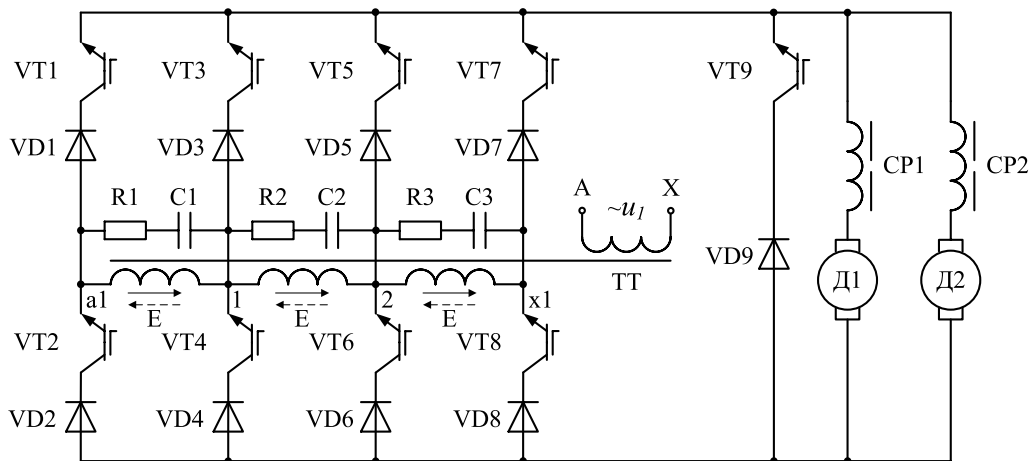
к амплитудному значению выпрямленного напряжения (рис. 2, а). Можно отметить, что на вторичной обмотке тягового трансформатора электровоза с тиристорным ВИП установлены конденсаторы *C11, C12* и *C1* и ограничитель перенапряжений *F2* (рис. 1), однако выполняющие роль только защиты от атмосферных перенапряжений и не предназначенные для гашения колебаний, возникающих из-за коммутации тириستоров.

А вот транзисторный ВИП, представленный на рис. 3, однозначно может снизить

межпоездной интервал времени при вождении поездов по технологии «Виртуальная сцепка». Алгоритм управления транзисторами плеч ВИП, представленный в табл. 2, обеспечивает относительно высокий коэффициент мощности на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения. Диаграмма управления  $U_{упр}$ , представленная на рис. 4, б, позволяет симметризовать амплитудные значения потребляемого тока с амплитудными значениями переменного напряжения.



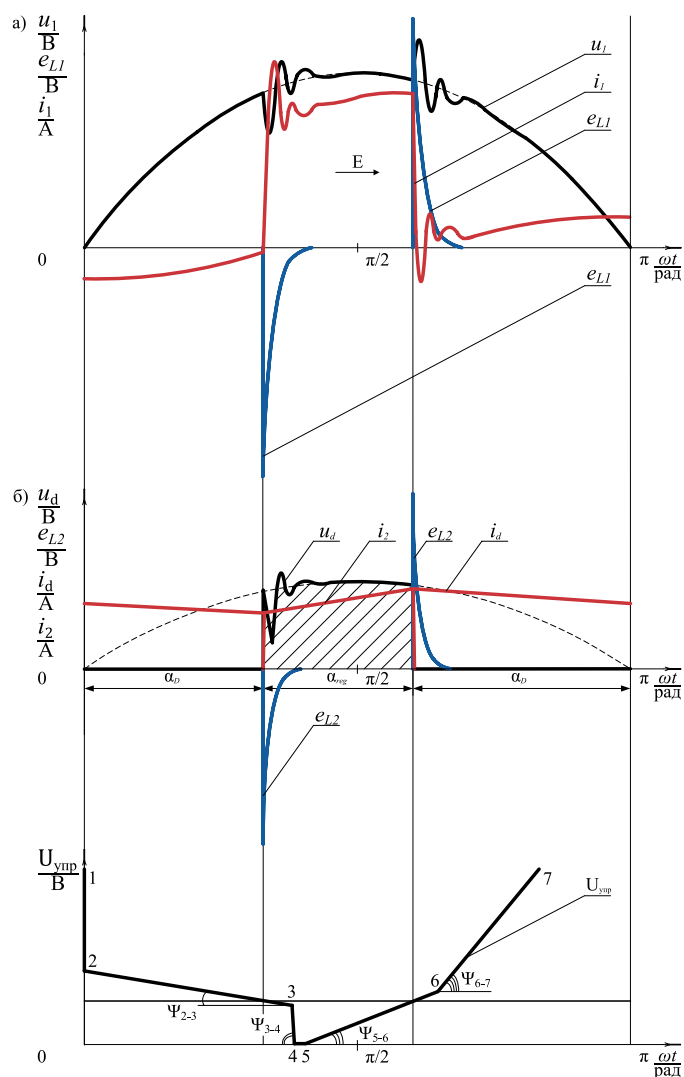
**Рис. 2.** Электромагнитные процессы на токоприемнике (а) и в силовой цепи (б) электровоза переменного тока с тиристорным ВИП на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения ( $K_m = 0,49$ ):  $u_1, i_1$  — напряжение и ток на токоприемнике;  $u_d, i_d$  — выпрямленные напряжение и ток;  $E$  — направление ЭДС;  $\varphi$  — сдвиг фазы;  $U_d$  — средневыхрямленное напряжение;  $U_m$  — амплитудное выпрямленное напряжение;  $U_{упр}$  — диаграмма управления;  $\gamma$  — сетевая коммутация;  $\gamma_p$  — фазная коммутация;  $\gamma_{бк}$  — буферный контур;  $\alpha_0$  — нерегулируемый по фазе импульс управления;  $\alpha_p$  — регулируемый по фазе импульс управления



**Рис. 3.** Упрощенная принципиальная схема силовой цепи электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов:  
 $VT1-VT9$  — транзисторные плечи;  $VD1-VD9$  — диодные плечи;  
 $R1-R3$  — снабберные резисторы;  $C1-C3$  — снабберные конденсаторы

ТАБЛИЦА 2. Алгоритм управления транзисторами плеч ВИП и девятым разрядным плечом электровоза переменного тока

Номер зоны	Полупериод	Алгоритм подачи управляющего напряжения на транзисторы плеч ВИП								
		Плечи ВИП								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
I	→				$\alpha_{reg}$	$\alpha_{reg}$				$\alpha_D$
	←			$\alpha_{reg}$			$\alpha_{reg}$			$\alpha_D$



**Рис. 4.** Электромагнитные процессы на токоприемнике (а) и в силовой цепи (б) электровоза переменного тока с транзисторным ВИП на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения ( $K_m = 0,84$ ):

$\alpha_{reg}$  — временная зона регулирования открытия транзисторов плеч ВИП;  
 $\alpha_D$  — временная зона работы транзисторов плеча VT9;  $\Psi$  — углы наклона диаграммы управления транзисторами; 1–7 — интервалы  $U_{упр}$



Однако при таком алгоритме коммутация транзисторов плеч ВИП при включении и выключении также может происходить вблизи середины полупериода питающего напряжения тяговой сети, как показано на рис. 4, б. В результате этого практически мгновенно изменяются токи  $i_1$  и  $i_2$ , возникают выбросы ЭДС самоиндукции обмоток ТТ  $e_{L1}$  и  $e_{L2}$  (рис. 4 а, б), что вызывает колебания напряжения и тока на токоприемнике (рис. 4, а), увеличивается коэффициент гармонических составляющих напряжения по сравнению с тиристорным ВИП и может превышать предельно допустимое по ГОСТ 32144-2013 значение 5%.

Колебания напряжения при работе транзисторного ВИП обусловлены коммутацией тока транзисторов. В процессе включения и выключения транзисторов плеч ВИП происходит затухающий процесс заряда и разряда снабберных конденсаторов С1–С3 значительной емкости [18], искажающий форму питающего напряжения тяговой сети. Несмотря на это, использовать транзисторы в плечах ВИП без снабберных цепей нецелесообразно, так как колебания в таком случае могут вывести их из строя [19]. Помимо этого, при существующем алгоритме работы транзисторного ВИП искажается форма тока на токоприемнике электровоза (рис. 4, а).

С момента появления первых электровозов переменного тока с плавным регулированием напряжения и статическими преобразователями, генерирующих помехи в тяговой сети, предлагалось множество технических решений по повышению КЭ на их токоприемниках. Одним из них является способ разнофазного управления (РФУ), заключающийся в изменении алгоритма работы тиристорных плеч ВИП [20–23]. При таком способе управления момент включения тиристорных

плеч одного ВИП, образующих зону регулирования, сдвигается относительно момента включения тиристорных плеч другого ВИП внутри одной секции на угол  $\alpha_{рфУ}$ , при этом сдвиги углов управления чередуются по полупериодам. Таким образом, за счет наложения колебаний напряжения в противофазе (показано в круге на рис. 5) обеспечивается гашение определенной гармоники и снижается амплитуда ЭДС самоиндукции на токоприемнике благодаря увеличению времени спада и возрастания тока  $i_1$ . Угол  $\alpha_{рфУ}$  рассчитывается для определенных параметров тяговой сети и конкретного местоположения электровоза на фидерной зоне по формуле (1) [24, 25]:

$$\alpha_{рфУ} = \frac{180 \cdot f_c}{\frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{C_{кc} (L_{тп} + L_{тг} + L_{вт} + L_{кc} \cdot l + L')}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{рфУ}$  — угол сдвига по фазе моментов включения тиристорных плеч ВИП;

$f_c$  — частота питающего напряжения;

$C_{кc}$  — распределенная емкость контактной сети;

$L_{тг}$  — индуктивность тягового трансформатора;

$L_{тп}$  — индуктивность тяговой подстанции;

$L_{вт}$  — индуктивность цепи выпрямленного тока;

$L_{кc}$  — индуктивность контактной сети;

$L'$  — индуктивность, вызванная поверхностным эффектом;

$l$  — расстояние от электровоза до ближайшей тяговой подстанции.

Наиболее эффективным является вариант РФУ, при котором моменты включения тиристорных плеч ВИП сдвигаются друг относительно друга на величину  $\alpha_{рфУ}/2$  (рис. 5) [15, 26, 27]. Это позволяет сохранить

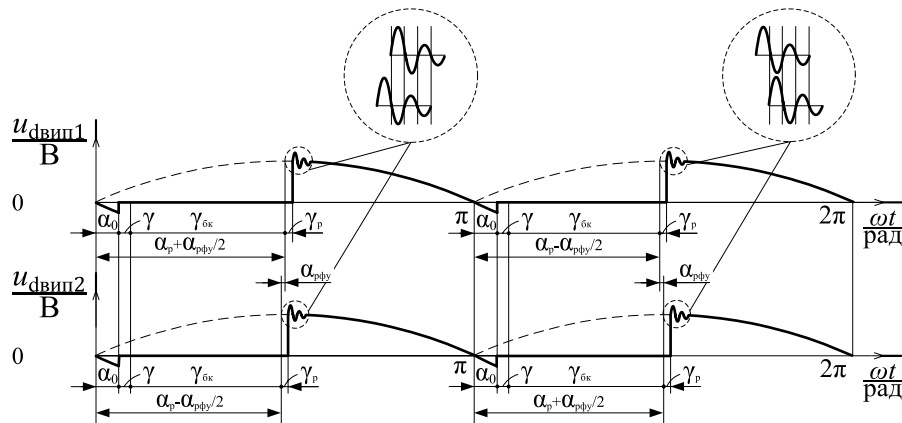


Рис. 5. Временная диаграмма работы тиристорного ВИП электровоза по алгоритму РФУ со сдвигами  $\alpha_{рфУ}/2$  на первой зоне регулирования

средневыпрямленное напряжение на уровне типового алгоритма управления тиристорами плеч ВИП.

Опираясь на существующие способы РФУ [15, 20–27], для повышения КЭ на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными ВИП на первой зоне регулирования предлагается способ разнесенного управления преобразователями (РУП) (рис. 6). Суть способа заключается в разнесении временных интервалов работы ВИП в полупериоде питающего напряжения тяговой сети, согласно которому при включении транзисторных плеч одного ВИП выключаются транзисторные плечи другого ВИП, а моменты включения и выключения вблизи границ полупериода разносятся на  $\alpha_{рфУ}$  с чередованием их по полупериодам. РУП для транзисторного ВИП выводит его на новый качественный уровень, так как позволяет эффективно устранять колебания различной амплитуды и частоты.

#### Выводы:

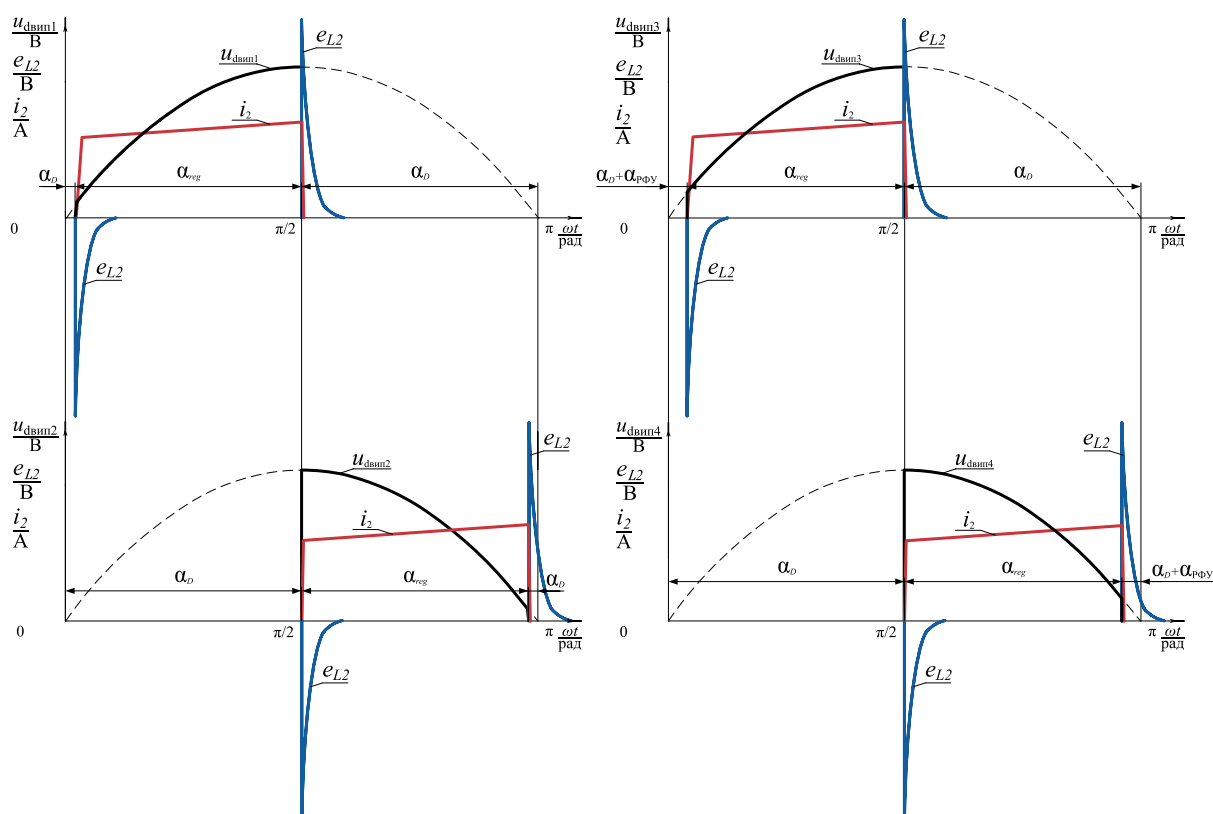
– эксплуатация электровозов с тиристорными ВИП (с коэффициентом мощности в среднем 0,49 на 0,5 зоны регулирования

выпрямленного напряжения) является на сегодня сдерживающим фактором полноценного использования новой технологии «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне;

– эксплуатация электровозов с транзисторными ВИП (с коэффициентом мощности в среднем 0,84 на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения) может существенно сократить время межпоездного интервала при использовании новой технологии «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне;

– предлагаемый способ РУП для электровоза с транзисторными ВИП на первой зоне регулирования позволит снизить гармонические составляющие тока и напряжения на токоприемнике электровоза ниже уровня гармоник, создаваемых работой тиристорного ВИП за счет разнесения моментов включения и выключения транзисторов плеч ВИП.

В дальнейшей работе авторы планируют провести исследования способа РУП на математической модели электрической системы «тяговая подстанция — контактная сеть — электровоз переменного тока с транзисторными ВИП».



**Рис. 6.** Временная диаграмма работы транзисторных ВИП электровоза переменного тока по способу разнесенного управления на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения

Статья подготовлена в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» на тему «Разработка цифрового двойника колесно-моторного блока электровоза «Ермак» серии 2(3)ЭС5К» № 1023033100293-1-2.1.5 от 03.07.2023 года. Этап 1: «Цифровой двойник колесно-моторного блока электровоза серии «Ермак» для увеличения пропускной способности Восточного полигона при реализации тяжеловесного движения».

### Библиографический список

1. Совещание по развитию отдельных направлений транспортного комплекса [Электронный ресурс]. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/68468> (дата обращения: 16.02.2024).

2. Виртуальная сцепка поездов позволит увеличить пропускную способность Восточного полигона [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=200681> (дата обращения: 16.02.2024).

3. Виртуальная сцепка ускоряет движение [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1594451> (дата обращения: 16.02.2024).

4. Виртуальная сцепка повысила пропускную способность [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1575196> (дата обращения: 16.02.2024).

5. Виртуальную сцепку показали в реальном времени [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1571259&archive=2021.07.08> (дата обращения: 16.02.2024).

6. Кулинич Ю. М., Дроглов Д. Ю. Исследование электромагнитных процессов в системе «контактная сеть — электровоз» при уменьшении минимального угла открытия тиристорov в выпрямительно-инверторном преобразователе // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта 2020. Т. 79, № 2. С. 93–102.
7. Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 24–25 марта 2020 года; под ред. И. К. Лакина. Красноярск: Акционерное общество «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», 2020. 360 с.
8. Мельниченко О. В., Цыбульский В. С., Чикиркин О. В. Повышение качества электрической энергии в контактной сети с целью снижения отказов электронного и силового электрооборудования электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 3 (19). С. 58–64.
9. Яговкин Д. А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 162 с.
10. Яговкин Д. А., Мельниченко О. В., Портной А. Ю. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT-модулях // Вестник института тяги и подвижного состава. 2013. № 9. С. 17–24.
11. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной и др. // Наука и техника транспорта. 2014. № 3. С. 46–51.
12. Структура математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока в режиме тяги / Яговкин Д. А., Портной А. Ю., Мельниченко О. В. и др. // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды II Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 20–21 сентября 2018 года. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. С. 121–129.
13. Яговкин Д. А., Мельниченко О. В. Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на высших зонах регулирования // Вестник ИрГТУ / Иркутский нац. иссл. тех. ун-т. Иркутск, 2014. № 5. С. 119–126.
14. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
15. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме тяги с помощью разнофазного управления выпрямителями на первой зоне регулирования // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 3. С. 26–30.
16. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: уч. для бакалавров, 12-е изд., исправ. и доп. М.: Юрайт, 2016. 701 с.
17. Власьевский С. В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока с рекуперативным торможением: дис. ... докт. техн. наук. Хабаровск, 2001. 396 с.
18. Шаров В. И. Радиотехника; предисл. ред. и некролог «Памяти В. И. Шарова»: проф. Н. Н. Циклинский. М.; Л.: Кубуч, 1934. 544 с.
19. Линьков А. О. Исследование цепей защиты от коммутационных перенапряжений выпрямительной установки возбуждения электровоза на IGBT-транзисторах // Вестник ИрГТУ. 2014. № 5 (88).

20. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт, 1988. 311 с.

21. Кучумов В. А., Находкин В. В., Широченко Н. Н. Техничко-экономические показатели тиристорных электровозов переменного тока с разнофазным управлением // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 3. С. 15–18.

22. Испытания электровоза ВЛ85 с разнофазным управлением выпрямительно-инверторными преобразователями / Ю. М. Кулинич, В. В. Находкин, Н. Н. Широченко и др. // Вестник ВНИИЖТ. 1986. № 4. С. 23–26.

23. Тихменев Б. Н., Фроленков И. Н. Мешающее влияние на связь при разнофазном регулировании напряжения тяговых двигателей // Вестник ВНИИЖТ. 1972. № 1. С. 1–5.

24. Мельниченко О. В., Газизов Ю. В. Испытание адаптивной системы разнофазного управления электровоза ВЛ80Р // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. ДВГУПС. 2011. Т. 1. С. 18–23.

25. Газизов Ю. В. Повышение качества электрической энергии в тяговой сети при работе электровоза переменного тока с адаптивной системой раз-

нофазного управления в режиме тяги: дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2011. 222 с.

26. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Энергосберегающий алгоритм разнофазного управления четырехзонного выпрямительного преобразователя электровоза // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 13–19.

27. Мельниченко О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока: дис. ... докт. техн. наук. Хабаровск, 2015. 392 с.

Дата поступления: 19.01.2024

Решение о публикации: 21.02.2024

#### **Контактная информация:**

ГРИГОРЕНКО Павел Владимирович — аспирант;  
grigorenko.pv@mail.ru

МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав»; olegmelnval@mail.ru

ПОРТНОЙ Александр Юрьевич — докт. физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение»; portnoy\_alexander@mail.ru

САМОЙЛОВА Анастасия Сергеевна — аспирант;  
a.s.samoilova@mail.ru

## Development of a method for spaced control of transistor traction converters of an electric locomotive in the first rectified voltage regulation zone

P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoiloa

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

**For citation:** Development of a method for spaced control of transistor traction converters of an electric locomotive in the first rectified voltage regulation zone / Grigorenko P. V., Mel'nichenko O. V., Portnoy A. Yu., Samoiloa A. S. // Proceedings of Petersburg Transport University, 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264

### Abstract

**Objective:** to develop a way to improve the quality of electricity on the current collector of an alternating current electric locomotive when it is operating in the first control zone with transistor traction converters. **Methods:** the electromagnetic processes on the current collector and in the power circuit of an alternating current electric locomotive with thyristor and transistor traction converters are analyzed, their comparison is made according to the criterion of distortion of the quality of electricity on the current collector. The electromagnetic processes on the current collector and in the power circuit of an alternating current electric locomotive with transistor traction converters operating according to the proposed method — spaced control are analyzed. **Results:** the causes of voltage and current fluctuations on the current collector of an alternating current electric locomotive with a transistor traction converters in the first rectified voltage regulation zone have been identified. A method of spaced control of transistor traction converters has been developed, which allows reducing the total coefficient of harmonic components of current and voltage on the current collector of an alternating current electric locomotive. **Practical importance:** the developed method of spaced control can be used on AC electric locomotives after their conversion to transistor traction converters, as well as in the design of new electric locomotives.

**Keywords:** alternating current electric locomotive, rectifier-inverter converter, collector electric drive, IGBT-transistors, power quality, energy efficiency.

### References

1. Soveshhanie po razvitiyu otdel'nykh napravlenij transportnogo kompleksa [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/68468> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
2. Virtual'naja scepka poezdov pozvolit uvelichit' propusknuju sposobnost' Vostochnogo poligona [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=200681> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
3. Virtual'naja scepka uskorjaet dvizhenie [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1594451> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
4. Virtual'naja scepka povysila propusknuju sposobnost' [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://gudok.ru/news-](https://gudok.ru/news-paper/?ID=1575196)
5. Virtual'nuju scepku pokazali v real'nom vremeni [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1571259&archive=2021.07.08> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
6. Kulinich Ju. M., Drogolov D. Ju. Issledovanie jelektromagnitnykh processov v sisteme «kontaktnaja set' — jelektrovoz» pri umen'shenii minimal'nogo ugla otkrytija tiristorov v vyprjमितel'no-invertornom preobrazovatele // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta 2020. T. 79, № 2. S. 93–102. (In Russian)
7. Jekspluatacija i obsluzhivanie jelektronnogo i mikroprocessornogo oborudovanija tjagovogo podvizh-

nogo sastava: trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Krasnojarsk, 24–25 marta 2020 goda; pod red. I. K. Lakina. Krasnojarsk: Akcionernoe obshhestvo «Dorozhnyj centr vnedrenija Krasnojarskoj zheleznoj dorogi», 2020. 360 s. (In Russian)

8. Mel'nichenko O. V., Cybul'skij V. S., Chikirkin O. V. Povysenie kachestva jelektricheskoy jenerгии v kontaktnoj seti s cel'ju snizhenija otkazov jelektronogo i silovogo jelektooborudovanija jelektovoza // Sovremennye tehnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie. 2008. № 3 (19). S. 58–64. (In Russian)

9. Jagovkin D. A. Sovershenstvovanie vyprjatel'no-invertornogo preobrazovatelja jelektovoza peremennogo toka i principa ego upravlenija v rezhime tjagi: dis. ... kand. tehn. nauk. SPb., 2016. 162 s. (In Russian)

10. Jagovkin D. A., Mel'nichenko O. V., Portnoj A. Ju. Razrabotka novogo jenergosberegajushhego algoritma upravlenija VIP jelektovoza na IGBT-moduljah // Vestnik instituta tjagi i podvizhnogo sastava. 2013. № 9. S. 17–24. (In Russian)

11. Novyj vyprjatel'no-invertornyj preobrazovatel' dlja tjagovogo podvizhnogo sastava peremennogo toka s povyshennymi jenergeticheskimi karakteristikami v rezhime tjagi / D. A. Jagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Ju. Portnoj i dr. // Nauka i tehnika transporta. 2014. № 3. S. 46–51. (In Russian)

12. Struktura matematicheskoy modeli vyprjatel'no-invertornogo preobrazovatelja na IGBT-tranzistorah dlja jelektovoza peremennogo toka v rezhime tjagi / Jagovkin D. A., Portnoj A. Ju., Mel'nichenko O. V. i dr. // Jelektoprivod na transporte i v promyshlennosti: trudy II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Habarovsk, 20–21 sentjabrja 2018 goda. Habarovsk: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2018. S. 121–129. (In Russian)

13. Jagovkin D. A. Mel'nichenko O. V. Jeksperimental'nyj stend dlja issledovanija processov raboty tiristornogo i tranzistornogo vyprjatel'no-invertornyh

preobrazovatelej jelektovoza peremennogo toka v rezhime tjagi na vysshih zonah regulirovanija // Vestnik IrGTU / Irkutskij nac. issl. teh. un-t. Irkutsk, 2014. № 5. S. 119–126. (In Russian)

14. GOST 32144-2013 «Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnicheskikh sredstv jelekto-magnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelekto-snbzhenija obshhego naznachenija». M.: Standartinform, 2014. 19 s. (In Russian)

15. Mel'nichenko O. V., Vlas'evskij S. V. Povysenie jenergeticheskoy jeffektivnosti jelektovoza peremennogo toka v rezhime tjagi s pomoshh'ju raznofaznogo upravlenija vyprjateljami na pervoj zone regulirovanija // Jelektronika i jelektooborudovanie transporta. 2014. № 3. S. 26–30. (In Russian)

16. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy jelekto-trotehniki. Jelektricheskie cepi: uch. dlja bakalavrov, 12-e izd., isprav. i dop. M.: Jurajt, 2016. 701 s. (In Russian)

17. Vlas'evskij S. V. Povysenie jeffektivnosti vyprjatel'no-invertornyh preobrazovatelej jelekto-vozozev peremennogo toka s rekuperativnym tormozheniem: dis. ... dokt. tehn. nauk. Habarovsk, 2001. 396 s. (In Russian)

18. Sharov V. I. Radiotehnika; predisl. red. i nekrolog «Pamjati V. I. Sharova»: prof. N. N. Ciklinskij. M.; L.: Kubuch, 1934. 544 s.

19. Lin'kov A. O. Issledovanie cepej zashhity ot kommutacionnyh perenaprjazhenij vyprjatel'noj ustanovki vozbuzhdenija jelektovoza na IGBT-tranzistorah // Vestnik IrGTU. 2014. № 5 (88). (In Russian)

20. Tihmenev B. N., Kuchumov V. A. Jelektovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovateljami. M.: Transport, 1988. 311 s. (In Russian)

21. Kuchumov V. A., Nahodkin V. V., Shirochenko N. N. Tehniko-jekonomicheskie pokazateli tiristornyh jelektovozozev peremennogo toka s raznofaznym upravleniem // Vestnik VNIIZhT. 1987. № 3. S. 15–18. (In Russian)

22. Ispytanija jelektovoza VL85 s raznofaznym upravleniem vyprjatel'no-invertornymi preobrazo-

vateljami / Ju. M. Kulinich, V. V. Nahodkin, N. N. Shirochenko i dr. // Vestnik VNIIZhT. 1986. № 4. S. 23–26. (In Russian)

23. Tihmenev B. N., Frolenkov I. N. Meshajushhee vliyanie na svjaz' pri raznofaznom regulirovanii naprjazhenija tjagovyh dvigatelej // Vestnik VNIIZhT. 1972. № 1. S. 1–5. (In Russian)

24. Mel'nichenko O. V., Gazizov Ju. V. Ispytanie adaptivnoj sistemy raznofaznogo upravlenija jelektrovoza VL80R // Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: trudy Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. DVGUPS. 2011. T. 1. S. 18–23. (In Russian)

25. Gazizov Ju. V. Povyshenie kachestva jelektricheskoy jenergii v tjagovoj seti pri rabote jelektrovoza peremennogo toka s adaptivnoj sistemoj raznofaznogo upravlenija v rezhime tjagi: dis. ... kand. tehn. nauk. Habarovsk, 2011. 222 s. (In Russian)

26. Mel'nichenko O. V., Vlas'evskij S. V. Jenergosberegajushhij algoritm raznofaznogo upravlenija chetyrehzonnogo vyprjamitel'nogo preobrazovatelja

jelektrovoza // Jelektronika i jelektrooborudovanie transporta. 2014. № 4. S. 13–19. (In Russian)

27. Mel'nichenko O. V. Povyshenie jenergeticheskoy jeffektivnosti tjagovyh jelektroprivodov jelektrovozov peremennogo toka: dis. ... dokt. tehn. nauk. Habarovsk, 2015. 392 s. (In Russian)

Received: 19.01.2024

Accepted: 21.02.2024

**Author's information:**

Pavel V. GRIGORENKO — Postgraduate Student;  
grigorenko.pv@mail.ru

Oleg V. MEL'NICHENKO — Dr. Sci. in Engineering,  
Full Professor, Head of the Department of Electric  
Rolling Stock; olegmelnval@mail.ru

Aleksandr Yu. PORTNOY — Dr. Sci. in Physical  
and Mathematical, Associate Professor, Professor  
of the Department Physics, Mechanics and Instrument  
Engineering; portnoy\_alexander@mail.ru

Anastasia S. SAMOILOVA — Postgraduate Student;  
a.s.samoilova@mail.ru



УДК 625.12

## Оценка интенсивности накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна на участках обращения тяжеловесных и длинносоставных поездов

**А. В. Романов, А. А. Киселев, А. А. Мирошник, М. В. Бушуев,  
Н. В. Канашин, Д. А. Афонин, И. А. Карпов**

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

**Для цитирования:** Оценка интенсивности накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна на участках обращения тяжеловесных и длинносоставных поездов / Романов А. В., Киселев А. А., Мирошник А. А., Бушуев М. В., Канашин Н. В., Афонин Д. А., Карпов И. А. // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 265–273. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-265-273

### Аннотация

**Цель:** оценка интенсивности накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна на участках обращения тяжеловесных и длинносоставных поездов, сформированных из вагонов с осевой нагрузкой до 25 тс. **Методы:** измерения остаточных деформаций основной площадки земляного полотна производились геодезическими методами путем проложения замкнутого нивелирного хода. Для этого каждый экспериментальный участок был оборудован грунтовыми марками, установленными на основную площадку земляного полотна и реперами. Измерения проводились с 30.05.2022 года по 08.11.2023 года. **Результаты:** установлены зависимости накопления остаточных деформаций земляного полотна от пропущенного тоннажа при различных конструкциях железнодорожного пути, условиях эксплуатации и инженерно-геологических условиях. **Практическая значимость:** предложены мероприятия по снижению интенсивности накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна.

**Ключевые слова:** тяжеловесные и длинносоставные поезда, взаимодействие пути и подвижного состава, остаточные деформации основной площадки земляного полотна, геосинтетические материалы, подбалластные защитные слои.

### Введение

Растущие объемы перевозок на основных направлениях сети ОАО «РЖД» ставят задачу перед путевым хозяйством снизить затраты на обслуживание и ремонт железнодорожного пути и увеличить межремонтный ресурс для различных условий эксплуатации. Ведущие научно-исследовательские институты, инжиниринговые центры и транспортные университеты ведут работу по созданию новой конструкции пути, обеспечивающей

наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа. При этом вопрос обеспечения прочности и устойчивости конструкции, то есть по первому предельному состоянию, на сегодняшний день полностью решен.

На сети дорог продолжает расти протяженность участков с деформациями земляного полотна, в кривых участках пути радиусом менее 650 м ресурс рельсов не достигает 200 млн т брутто. Обеспечение требуемой

деформативности по второму предельному состоянию, повышение ресурса рельсов и колес возможно путем оптимизации взаимодействия в системе «колесо — рельс» [1]. На уровень силового воздействия влияет множество факторов, одним из которых является наличие неровностей на пути, которые формируют соответствующие силы инерции от подвижного состава. Неровности на пути формируются за счет деформаций верхнего строения пути (подрельсовые прокладки и балласт) и основной площадки земляного полотна [2].

На интенсивность накопления остаточных деформаций земляного полотна влияет уровень вибродинамического воздействия [3]. Модуль деформации, угол внутреннего трения и удельное сцепление грунтов основной площадки земляного полотна при действии вибродинамической нагрузки может снижаться на 30–40% [4, 5].

Целью данной работы является определение интенсивности накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна (далее — ОПЗП) на особогрузонапряженных участках Октябрьской железной дороги.

### Описание экспериментальных участков

Для оценки интенсивности накопления остаточных деформаций ОПЗП были выбраны три участка на направлении Мга — Гатчина — Веймарн — Усть-Луга, на котором обращаются тяжеловесные и длинносоставные поезда, а также один контрольный участок на направлении Веймарн — Ивангород, на котором эти поезда не обращаются. Характеристики участков представлены в табл. 1.

Участки № 1 и № 2 расположены на насыпи высотой 1,95 м и 4,5 м соответственно, сложенной из мелкого песка. Участок № 3 расположен в выемке глубиной 1 м, в основании которой залегают мелкие пески толщиной до 1 м. Контрольный участок № 4 расположен на насыпи высотой 1,8 м, сложенной из песка с примесью щебня.

Каждый экспериментальный участок был оборудован опорной геодезической высотной сетью. По три грунтовых репера были установлены на расстоянии не менее 50 м от оси пути, глубина погружения зависела от местных условий и составила от 2 до 5 м. На основную площадку земляного полотна были установлены грунтовые деформационные

ТАБЛИЦА 1. Характеристики экспериментальных участков

Характеристики участка	Участок № 1	Участок № 2	Участок № 3	Участок № 4 (контрольный)
Грузонапряженность, млн т·км брутто / км в год	185,5	139,9	139,9	15,4
Скорость движения, км/ч	80/80	80/60	80/80	100/80
Класс пути	1ОП	1ОП	1ОП	3ГШ
Пропущенный тоннаж, млн т брутто	208,8	919,84	785,2	739,1
Радиус кривой, м	610	605	620	625
Верхнее строение пути				
– конструкция пути	Бесстыковой путь, Р65			
– промежуточное скрепление	АРС-4			КБ-65
– балласт	Щебеночный до 50 см			
– защитный слой	ЩПС	ЩПС	ЩПС	–
– разделительный слой	геотекстиль, геосетка		геосетка	–

марки как в продольном, так и поперечном направлении. На рис. 1 представлена типовая схема расположения грунтовых марок на экспериментальном участке.

### Японский метод нивелирования

Согласно пункту 4.2 ГОСТ 24846-2019 [6], класс точности измерения вертикальных деформаций основной площадки земляного полотна установлен III, то есть допустимая погрешность измерения вертикальных деформаций составляет 5 мм. Таким образом, допустимая погрешность определения высот грунтовых деформационных марок не должна превышать 3,5 мм, а положение высотной опорной сети следует выполнять по классу точности на ступень выше, чем класс точности деформационной сети, то есть по II классу.

Согласно ГОСТ 24846-2019 [6], в каждый цикл наблюдений выполнялся контроль стабильности опорных реперов в кусте. Учиты-

вая, что удаленность друг от друга реперов в кусте составляет не более 30 м, нивелирование выполнялось с одной станции высокоточным цифровым нивелиром Trimble DiNi 03 в комплекте с инварной рейкой LD12 с соблюдением равенства плеч. Паспортная средняя квадратическая погрешность определения превышения на 1 км двойного хода по инварной рейке со штрихкодовой разметкой составляет 0,3 мм.

Нивелирование грунтовых деформационных марок выполнялось по замкнутому ходу в двух направлениях нивелиром Trimble DiNi 03 и инварной рейкой LD12 при двух горизонтах инструмента на каждой станции нивелирования. Нивелирование выполнялось из середины, разности плеч на станции не превышали 1 м, а накопление неравенства плеч — 5 м. Часть марок использовалась как связующая точка, и превышения по ним были получены дважды: в прямом и обратном



**Рис. 1.** Схема расположения грунтовых деформационных марок и опорных реперов на экспериментальном участке

направлениях. Отклонения в полученных значениях не превысили 0,8 мм.

Перед началом работы, за 45 мин до начала наблюдений, нивелир устанавливался на штативе в тени, для того чтобы он принял температуру окружающего воздуха, и затем выполнялось определение угла  $i$  двойным нивелированием по японскому методу в следующей последовательности (рис. 2) [7]. На равнинном участке местности в точках  $A$  и  $B$ , находящихся на расстоянии всего  $S = 30$  м друг от друга, устанавливают нивелирные башмаки или забивают костыли. На этих точках ставят отвесно рейки. Первая станция нивелирования расположена посере-

дине, между точками  $A$  и  $B$  (станция 1). Приводят нивелир в рабочее положение 2 и берут отсчеты  $a_1, b_1$ . Переносят нивелир за точку  $B$  на расстоянии  $S_1 = 3$  м и после приведения его в рабочее положение берут отсчеты по рейкам  $b_2, a_2$ . Значение угла  $i$  вычисляют по формуле:

$$i = \frac{(a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)}{S} = \frac{h_2 - h_1}{2}.$$

### Результаты измерений

В период с 30.05.2022 года по 08.11.2023 года проведены 23 цикла геодезических измерений остаточных деформаций ОПЗП. Результаты представлены на рис. 3–7.

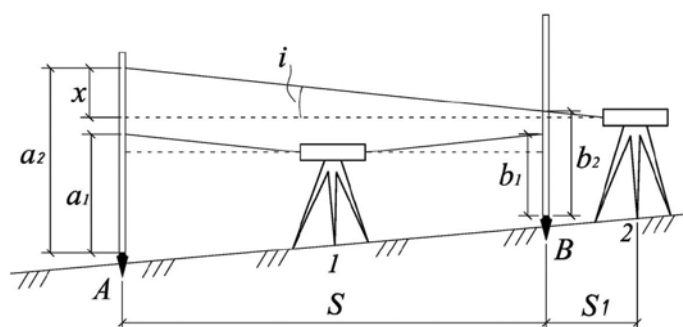
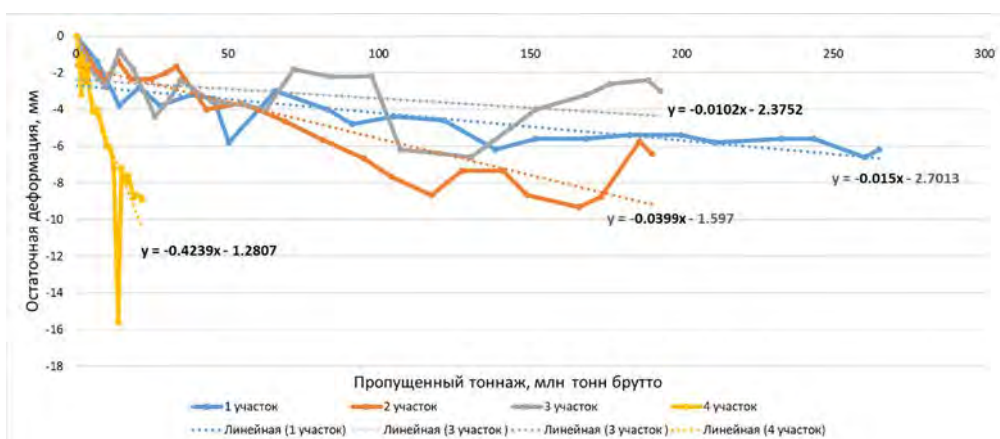


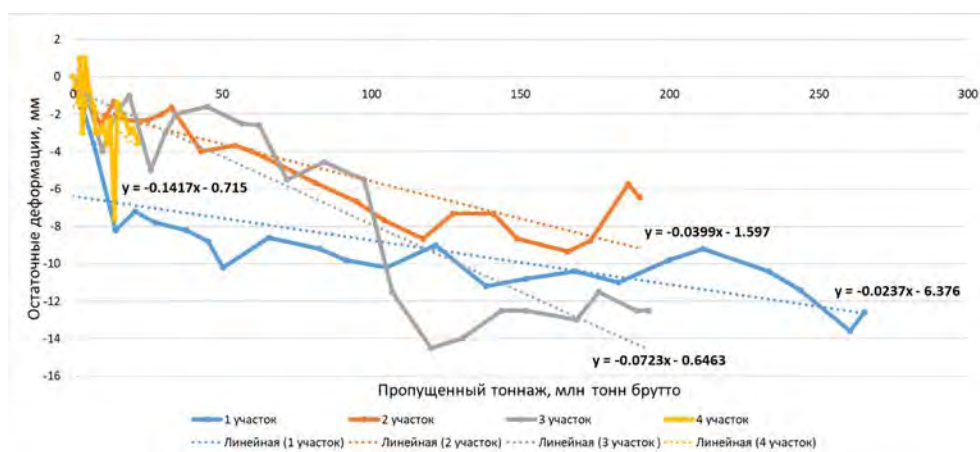
Рис. 2. Схема определения угла по японскому методу



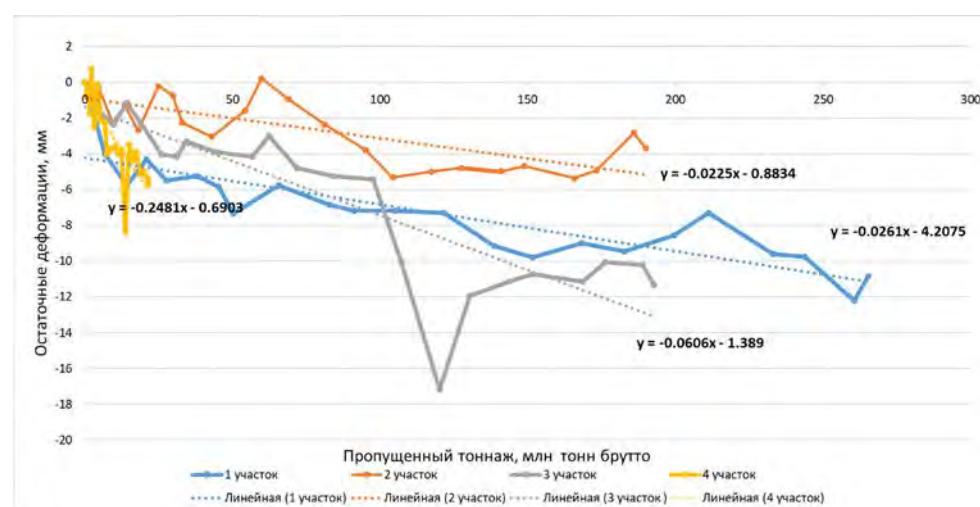
Рис. 3. Результаты измерений остаточных деформаций основной площадки земляного полотна. Конец переходной кривой (КПК), средние значения



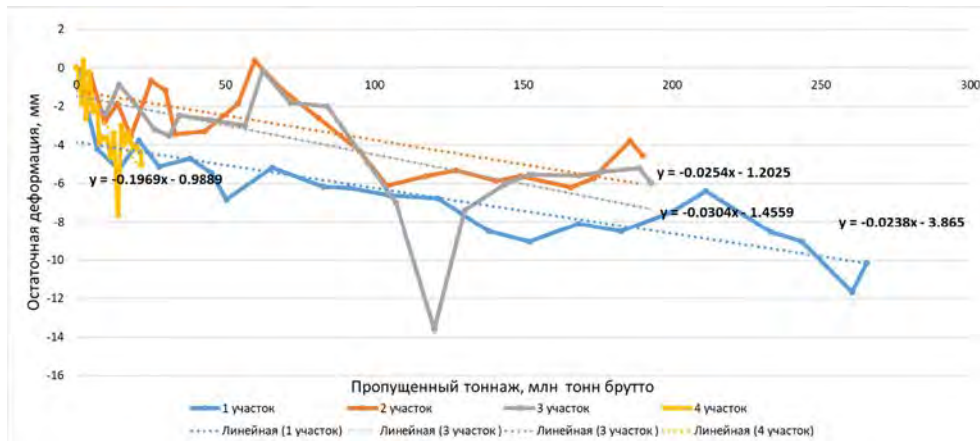
**Рис. 4.** Результаты измерений остаточных деформаций основной площадки земляного полотна. Начало переходной кривой (НПК), средние значения



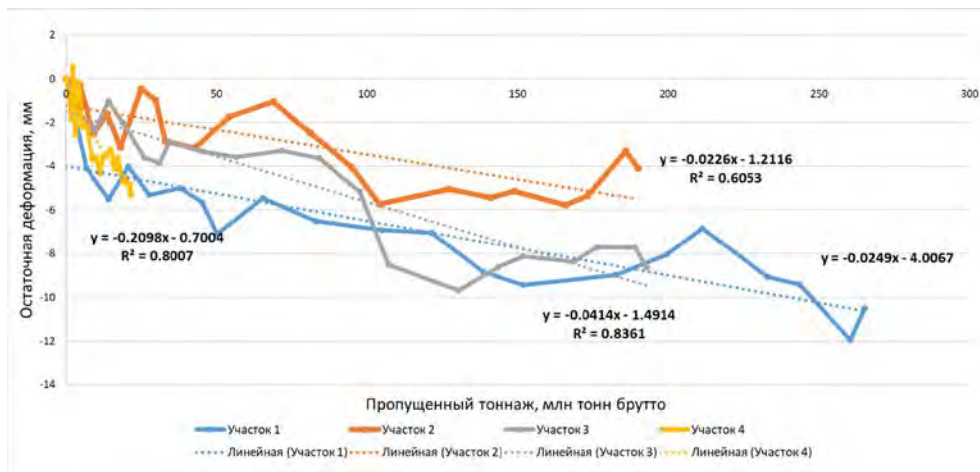
**Рис. 5.** Результаты измерений остаточных деформаций основной площадки земляного полотна. Середина круговой кривой (СКК), средние значения



**Рис. 6.** Результаты измерений остаточных деформаций основной площадки земляного полотна. Внутренняя рельсовая нить, средние значения



**Рис. 7.** Результаты измерений остаточных деформаций основной площадки земляного полотна. Наружная рельсовая нить, средние значения



**Рис. 8.** Результаты измерений остаточных деформаций основной площадки земляного полотна. Сводный график

### Заключение

На рис. 8 представлен сводный график результатов измерений остаточных деформаций ОПЗП. Результаты наблюдений показывают, что накопление остаточных деформаций ОПЗП может быть аппроксимировано линейной зависимостью:

$$\Delta \varepsilon = aT - \delta,$$

где  $a$  — интенсивность накопления остаточных деформаций, мм/млн т брутто;

$T$  — пропущенный тоннаж, млн т брутто;  
 $\delta$  — поправочный коэффициент, учитывающий первоначальную осадку деформационной марки.

Интенсивность накопления остаточных деформаций зависит от инженерно-геологических условий участка. На экспериментальных участках № 1 и № 2, где обращаются тяжеловесные и длинносоставные поезда, сформированные из вагонов с осевой нагрузкой 23,5 и 25 т/ось, интенсивность накопления остаточных деформаций

основной площадки земляного полотна составила 0,022–0,025 мм/млн т брутто, в то время как на участке № 3, расположенном в выемке, интенсивность накопления остаточных деформаций зафиксирована практически в 2 раза выше — до 0,041 мм/млн т брутто. Грузонапряженность экспериментального участка № 1 составляет 185,5 млн т брутто на км в год, грузонапряженность экспериментального участка № 2 и № 3 составляет 139,9 млн т брутто на км в год. На интенсивность накопления остаточных деформаций влияет не только интервал между проследованиями поездов, но и конструкция железнодорожного пути. Участки № 1 и № 2 расположены на насыпях, сложенных из песчаных грунтов с защитным подбалластным слоем и разделительным слоем из геосетки. Участок № 3 расположен в выемке, где также уложен защитный подбалластный слой и разделительный слой из геосетки. При этом все участки расположены в сложных инженерно-геологических условиях. Основания земляного полотна сложены из текучих, водонасыщенных глинистых грунтов, склонных к снижению своих прочностных и деформативных характеристик под действием вибродинамической нагрузки.

На контрольном участке № 4 грузонапряженность составляет 15,4 млн т брутто на км в год, защитные и разделительные слои отсутствуют и интенсивность накопления остаточных деформаций основной площадки земляного полотна составила 0,182–0,3917 мм/млн т брутто, что существенно выше, чем на особогрузонапряженных участках. Причиной также могут являться время эксплуатации земляного полотна и уровень технического обслуживания, как на менее ответственном участке.

Одним из важных мероприятий, которые позволят существенно снизить интенсив-

ность накопления остаточных деформаций в балласте и земляном полотне, по нашему мнению, является армирование основной площадки земляного полотна и балласта геосинтетическими материалами.

Толщина защитного слоя под балластной призмой и необходимость его армирования геосинтетическими материалами должна определяться расчетом, исходя из условий:

- обеспечения несущей способности (прочности) грунтов земляного полотна, подстилающих защитный слой;
- достижения на поверхности основной площадки требуемого штампового модуля деформации;
- ограничения деформаций железнодорожного пути под воздействием морозного пучения грунтов.

На участках интенсивных неисправностей геометрических параметров рельсовой колеи, балластных углублений, выплесков и деформаций морозного пучения возможно применение геосинтетических материалов в балласте.

Применение этих решений позволит увеличить несущую способность балластного слоя до 2,1 раза и увеличить модуль общей деформации до 3 раз.

### Библиографический список

1. Певзнер В. О., Ромен Ю. С., Сидорова Е. А. и др. Влияние осевой нагрузки и состояния пути на интенсивность износа рельсов // *Техника железных дорог*. 2021. № 2 (54). С. 64–69.
2. Певзнер В. О., Чечельницкий А. И., Шапетько К. В. и др. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в условиях интенсификации перевозочного процесса // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2020. № 79 (5). С. 271–275. DOI: 10.21780/2223–9731–2020–79–5–271–275.

3. Железнов М. М., Певзнер В. О., Соловьев В. П. и др. Влияние длительности и частоты приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние пути // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. № 77(6). С. 364–367. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-6-364-367.

4. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... докт. техн. наук. Ленинград, 1982. 455 с.

5. Великотный В. П. Исследование деформируемости глинистых грунтов железнодорожного земляного полотна при вибродинамических нагрузках: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1980. 211 с.

6. ГОСТ 24846-2019 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200174422?ysclid=lsivu01jbi767452815> (дата обращения: 12.02.2024).

7. Филатова А. В., Самсонов А. Д. Особенности определения угла и цифровых нивелиров // Исследования. Инновации. Практика. 2022. № 4. С. 10–12.

Дата поступления: 20.01.2024

Решение о публикации: 24.02.2024

#### Контактная информация:

РОМАНОВ Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, доцент; [andrey.romanov@mail.ru](mailto:andrey.romanov@mail.ru)

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доцент; [zhdp10@gmail.com](mailto:zhdp10@gmail.com)

МИРОШНИК Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; [alexmiroschnik@mail.ru](mailto:alexmiroschnik@mail.ru)

БУШУЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, доцент; [8921918@mail.ru](mailto:8921918@mail.ru)

КАНАШИН Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент; [kanashin@pgups.ru](mailto:kanashin@pgups.ru)

АФОНИН Дмитрий Андреевич — канд. техн. наук, доцент; [afonin@pgups.ru](mailto:afonin@pgups.ru)

КАРПОВ Иван Алексеевич — аспирант; [karpov.ivan3920@yandex.ru](mailto:karpov.ivan3920@yandex.ru)

## Assessment of the intensity of accumulation of residual deformations of the main platform of the roadbed in the areas of circulation of heavy and long-component trains

**A. V. Romanov, A. A. Kiselyov, A. A. Miroshnik, M. V. Bushuev, N. V. Kanashin, D. A. Afonin, I. A. Karpov**

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

**For citation:** Assessment of the intensity of accumulation of residual deformations of the main platform of the roadbed in the areas of circulation of heavy and long-component trains / *Romanov A. V., Kiselyov A. A., Miroshnik A. A., Bushuev M. V., Kanashin N. V., Afonin D. A., Karpov I. A.* // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 265–273. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-265-273. (In Russian)

#### Abstract

**Objective:** the article presents an assessment of the intensity of accumulation of residual deformations of the main platform of the roadbed in the areas of circulation of heavy and long-composite trains formed from wagons with an axial load of up to 25 tons. **Methods:** measurements of residual deformations of the



main site of the roadbed were carried out by geodetic methods by laying a closed leveling course. To do this, each experimental site was equipped with soil stamps installed on the main site of the roadbed and reference points. The measurements were carried out from 30.05.2022 to 08.11.2023. **Results:** as a result, the dependences of the accumulation of residual deformations of the roadbed on the missed tonnage have been established for various railway track structures, operating conditions and engineering and geological conditions. **Practical importance:** measures are proposed to reduce the intensity of accumulation of residual deformations of the main site of the roadbed.

**Keywords:** heavy-weight and long-component trains, the interaction of track and rolling stock, residual deformations of the main platform of the roadbed, geosynthetic materials, protective layers under the ballast.

## References

1. Pevzner V. O., Romen Yu. S., Sidorova E. A. i dr. Vliyanie osevoj nagruzki i sostoyaniya puti na intensivnost' iznosa rel'sov // *Tekhnika zheleznih dorog*. 2021. No. 2 (54). S. 64–69. (In Russian)
2. Pevzner V. O., Chechel'nickij A. I., Shapet'ko K. V. i dr. Vliyanie dlennyh nerovnostej prodol'nogo profilya na bezopasnost' dvizheniya v usloviyah intensivifikatsii perevozhnogo processa // *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZHT)*. 2020. № 79 (5). S. 271–275. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-5-271-275. (In Russian)
3. Zheleznov M. M., Pevzner V. O., Solov'ev V. P. i dr. Vliyanie dlitel'nosti i chastoty prilozheniya nagruzki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie puti // *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZHT)*. 2018. No. 77 (6). S. 364–367. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-6-364-367. (In Russian)
4. Prokudin I. V. Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistyh gruntov, vosprinimayushchih vibrodinamicheskuyu nagruzku: dis. ... dokt. tekhn. nauk. Leningrad, 1982. 455 s. (In Russian)
5. Velikotnyj V. P. Issledovanie deformiruемости glinistyh gruntov zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna pri vibrodinamicheskikh nagruzkah: dis. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad, 1980. 211 s. (In Russian)
6. GOST 24846-2019 “Grunty. Metody izmereniya deformatsij osnovanij zdaniy i sooruzhenij” // *Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii [Elektronnyj resurs]*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200174422?ysclid=lsivu-01jbi767452815> (data obrashcheniya: 12.02.2024). (In Russian)
7. Filatova A. V., Samsonov A. D. Osobennosti opredeleniya ugla i cifrovyyh nivelirov // *Issledovaniya. Innovacii. Praktika*. 2022. № 4. S. 10–12. (In Russian)

Received: 20.01.2024

Accepted: 24.02.2024

### Author's information:

Andrey V. ROMANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; [andrey.romanov@mail.ru](mailto:andrey.romanov@mail.ru)

Artyom A. KISELYOV — PhD in Engineering, Associate Professor; [zhdp10@gmail.com](mailto:zhdp10@gmail.com)

Alexander A. MIROSHNIK — PhD in Engineering, Associate Professor; [alexmiroschnik@mail.ru](mailto:alexmiroschnik@mail.ru)

Mikhail V. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; [8921918@mail.ru](mailto:8921918@mail.ru)

Nikolay V. KANASHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; [kanashin@pgups.ru](mailto:kanashin@pgups.ru)

Dmitry A. AFONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; [afonin@pgups.ru](mailto:afonin@pgups.ru)

Ivan A. KARPOV — Postgraduate Student of the Department “Railway”; [karpov.ivan3920@yandex.ru](mailto:karpov.ivan3920@yandex.ru)

УДК 620.191.3:629.46-2

## Исследование ударной вязкости стали литых несущих деталей грузовых вагонов

Д. В. Даниленко<sup>1</sup>, В. П. Ефимов<sup>2</sup>, В. А. Чернов<sup>3</sup>, С. О. Комиченко<sup>4</sup>,  
Т. М. Чернова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «УК РМ РЕЙЛ», Россия, 430006, Республика Мордовия, Саранск, ул. Лодыгина, 11

<sup>2</sup> ООО «УИЩ-Вагоны», Россия, 622007, Свердловская область, Нижний Тагил, ул. Орджоникидзе, 22, оф. 28

<sup>3</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>4</sup> АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Исследование ударной вязкости стали литых несущих деталей грузовых вагонов / Даниленко Д. В., Ефимов В. П., Чернов В. А., Комиченко С. О., Чернова Т. М. // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 274–281. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-274-281

### Аннотация

**Цель:** проведение комплексных экспериментальных исследований ударной вязкости, литой стали 20ГЛ, которая применяется для изготовления несущих деталей грузовых вагонов. Получение серийной диаграммы зависимости величины ударной вязкости от температуры испытаний. **Методы:** применен метод механических испытаний образцов литой стали в условиях ударного нагружения, который позволяет получить количественные оценки способности материала сопротивляться ударному разрушению при различных температурах (испытания на ударную вязкость). Для исследования поверхности ударного разрушения применен микрографический анализ рельефа. **Результаты:** по результатам проведенных испытаний образцов из литой стали 20ГЛ построенные экспериментальные зависимости  $P = f(\tau)$ ;  $E = f(\tau)$  и серийная диаграмма (KCV — T), которые позволяют оценивать работоспособность литой стали при изготовлении несущих деталей вагонов для различных климатических условий эксплуатации. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют проводить работы по улучшению технологических и служебных свойств литых несущих деталей грузовых вагонов.

**Ключевые слова:** ударная вязкость литой стали, литые несущие детали, тележка грузового вагона.

Ударная вязкость является одной из важнейших механических характеристик, определяющих способность материала (его структуры) сопротивляться разрушению в рабочем диапазоне температур. Наиболее значимыми испытания на ударную вязкость являются для материалов с объемно-центрированной решеткой (в особенности для углеродистых и низколегированных сталей), поскольку позволяют установить температурный диапазон вязко-хрупкого перехода, определить

критическую температуру хрупкости и установить минимально допустимую температуру эксплуатации изделия, изготовленного из данного материала.

В качестве материала для исследования (как указано выше) использовали сталь 20ГЛ, из которой изготавливаются литые детали тележек грузовых вагонов [1, 2].

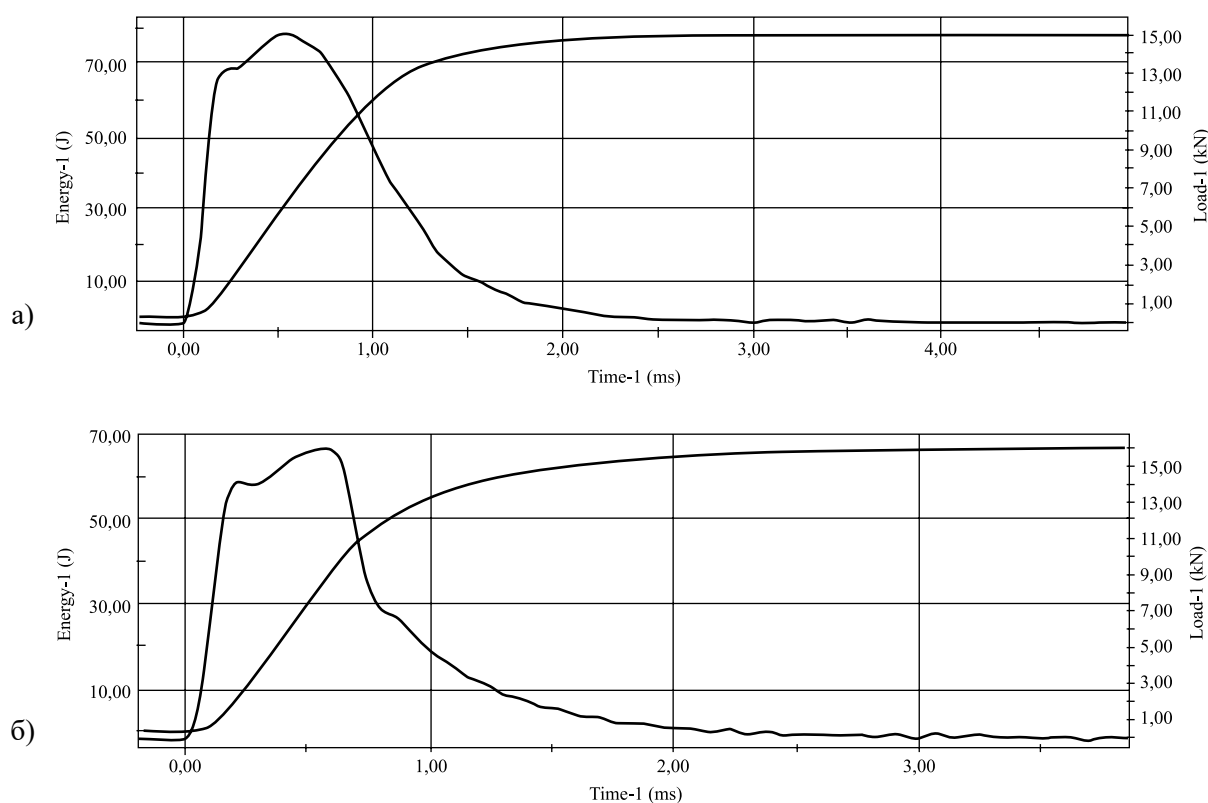
Ударные испытания проводили на инструментированном маятниковом копре фирмы «Инстрон» с максимальной энергией удара

400 Дж при температурах  $T = +50, +20, 0, -20, -40, -60$  и  $-75$  °С. В процессе ударного нагружения производилась непрерывная регистрация изменения ударной нагрузки. На каждом температурном уровне испытывали по 2–3 образца. Скорость движения маятника в момент удара составляла 5,26 м/с. В качестве образцов использовали прямоугольные балочные образцы размером 55 x 10 x 10 мм с V-образным надрезом (тип 11 по ГОСТ 9454-78). Методика проведения испытаний соответствовала требованиям стандарта ГОСТ 9454-78 [3].

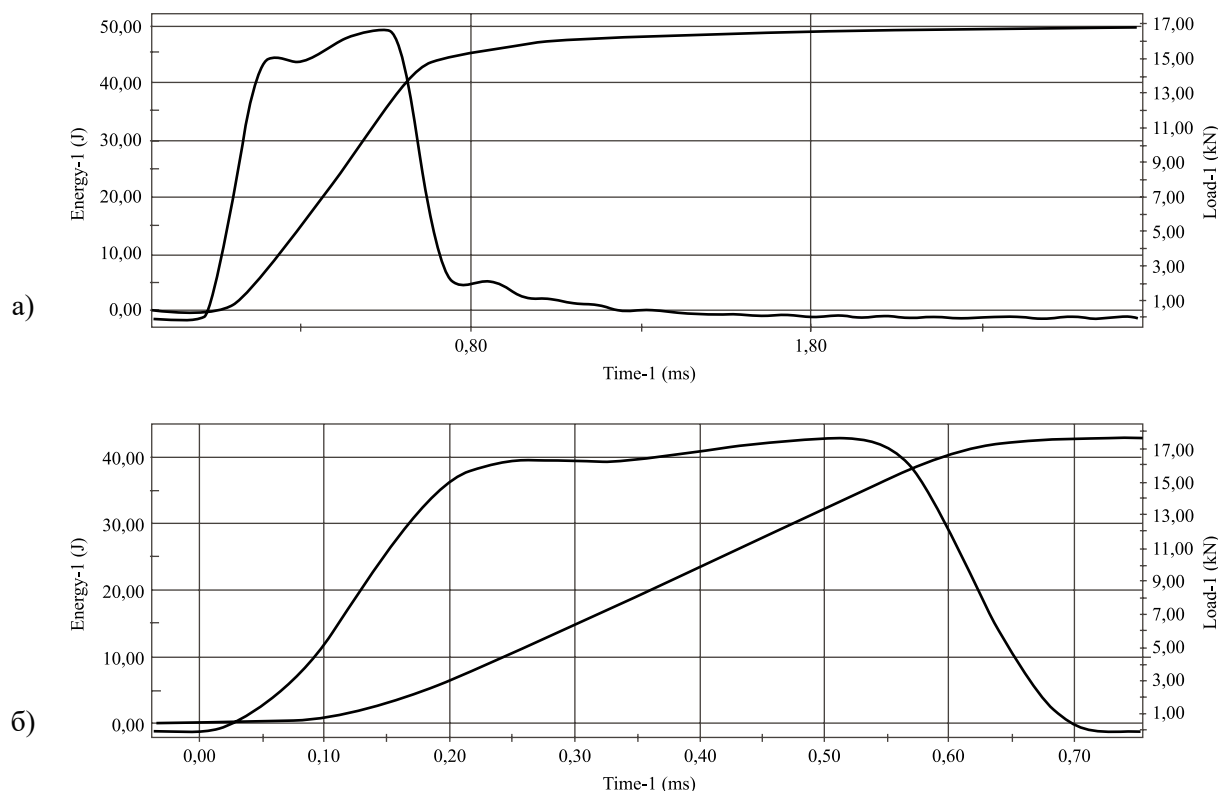
По результатам ударных испытаний определены значения ударной вязкости KCV, построены зависимости  $P = f(\tau)$ , где  $\tau$  — время ударного нагружения и сериальная диаграмма в координатах KCV – T (рис. 1–3).

На построенных по результатам испытаний зависимостях  $P = f(\tau)$  видно (рис. 1–2), что график этой зависимости в определенной степени подобен диаграмме растяжения цилиндрических образцов, то есть отчетливо выделяются две основные стадии деформирования балочного образца: стадия упругого деформирования (линейная область диаграммы) и стадия упругопластического деформирования (нелинейная область диаграммы). На второй стадии те же подобные закономерности: участок, подобный площадке текучести, участок упрочнения и ниспадающий участок, начало которого в первом приближении можно принимать за момент появления магистральной трещины ударного разрушения образца.

Анализ этой зависимости также позволяет проследить, как изменяется время полного



**Рис. 1.** Зависимости  $E = f(\tau)$  и  $P = f(\tau)$  для ударных образцов, испытанных при температурах  $+20$  °С (а) и  $0$  °С (б)



**Рис. 2.** Зависимости  $E = f(\tau)$  и  $P = f(\tau)$  для ударных образцов, испытанных при температурах  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

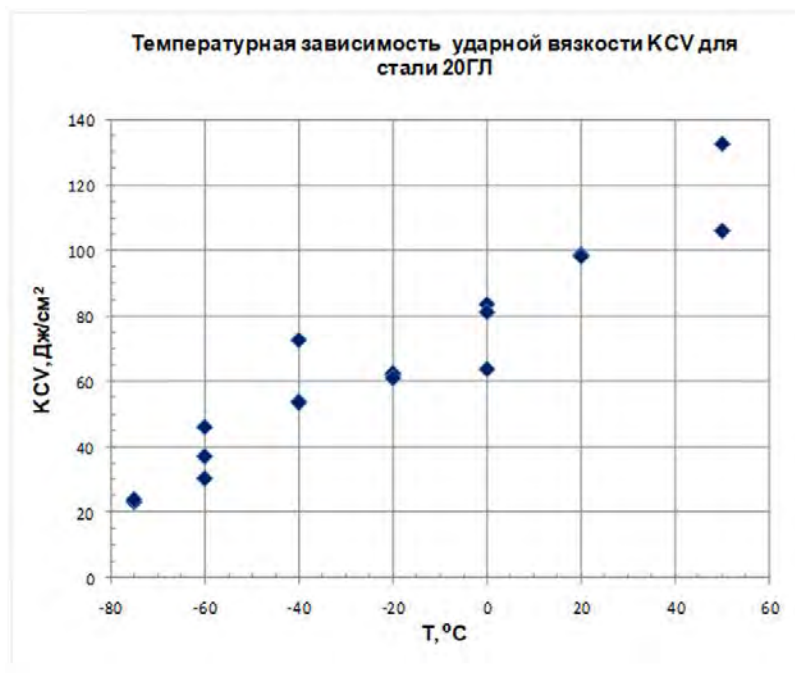
разрушения образца с изменением температуры испытания. При понижении температуры происходит уменьшение полного времени процесса разрушения образцов: от  $\sim 3$  мс (при  $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) до  $\sim 0,7$  мс (при  $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), то есть более чем в 4 раза.

Если принять в первом приближении, что зарождение магистральной трещины соответствует максимальному значению нагрузки на зависимости  $P = f(\tau)$ , можно дать оценку времени, затрачиваемому на зарождение ( $\tau_z$ ) и распространение ( $\tau_p$ ) трещины при ударном разрушении в зависимости от температуры испытания. Можно видеть, что до  $T > -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  время распространения трещины превышает время, затрачиваемое на зарождение трещины, то есть  $\tau_p > \tau_z$ . При  $T \leq -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  время

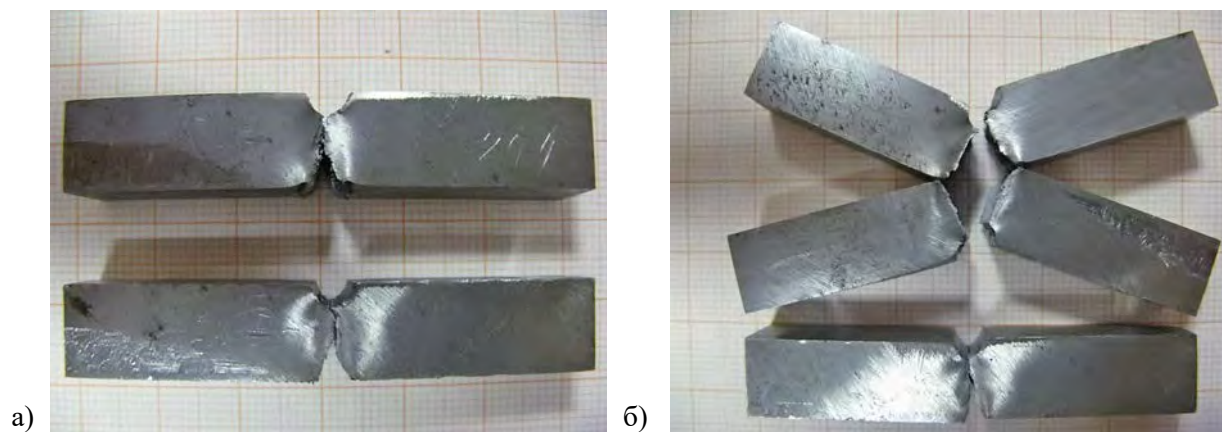
зарождения трещины превышает время ее распространения ( $\tau_p < \tau_z$ ).

Характер поведения зависимости ударной вязкости KCV от температуры испытания (диаграмма KCV – T, представленная на рис. 3) свидетельствует о том, происходит монотонное возрастание ее значений по мере увеличения температуры испытания в диапазоне  $-75\dots+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Анализ характера разрушения ударных образцов (рис. 4–6) и их изломов (рис. 7–9) показывает, что в указанном диапазоне температур происходит изменение механизмов разрушения: от вязкого ( $T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) к преимущественно хрупкому ( $T \leq -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), то есть реализуется вязко-хрупкий переход.

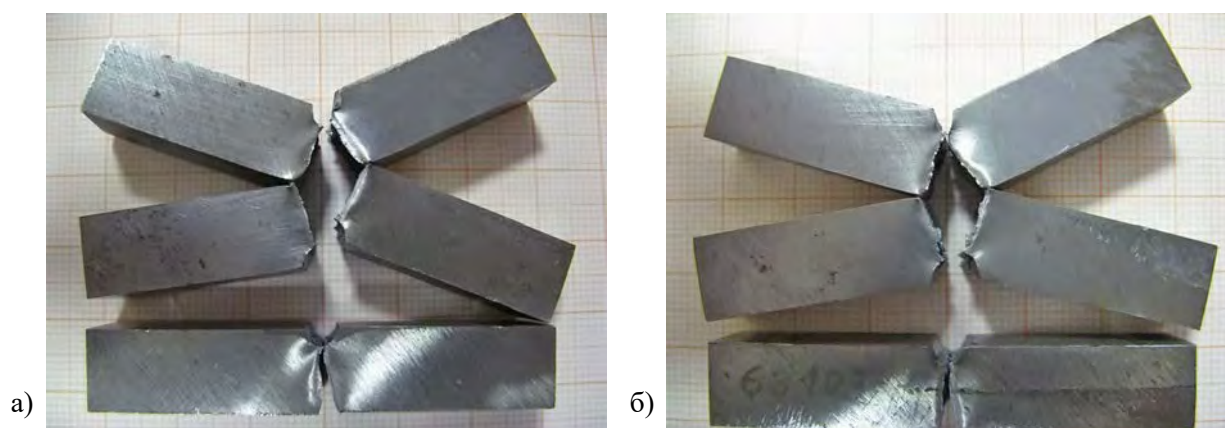
В соответствии с нормативными документами именно в этой области определяется



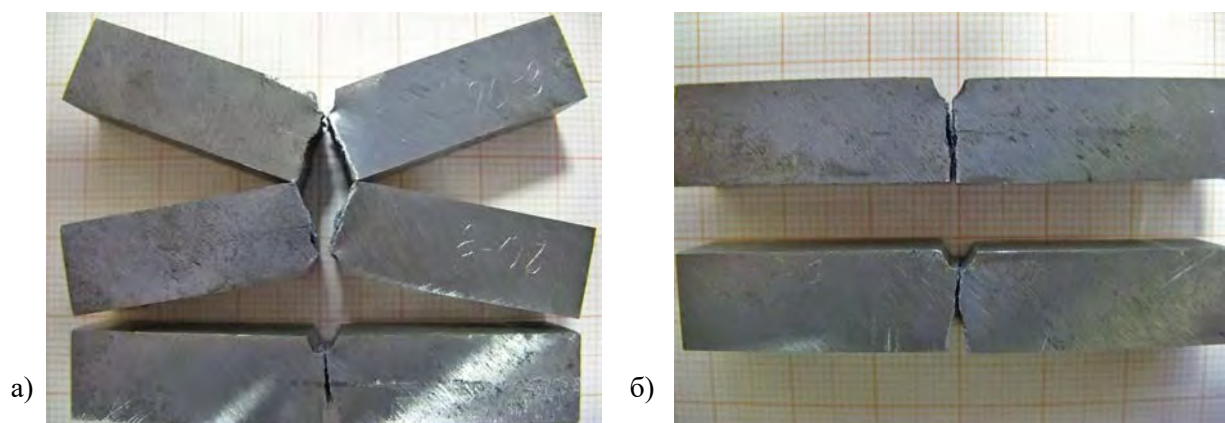
**Рис. 3.** Зависимость величины ударной вязкости KCV от температуры испытания для стали 20ГЛ



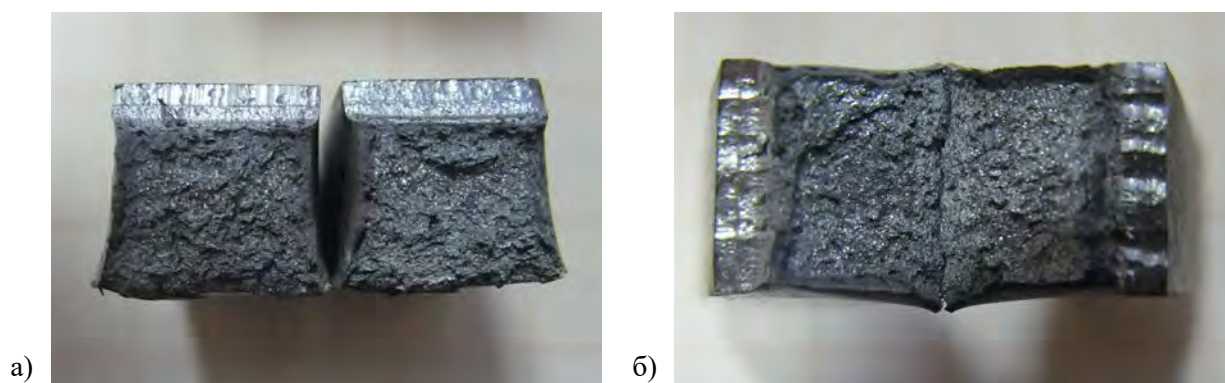
**Рис. 4.** Характер разрушения ударных образцов стали 20ГЛ при температурах испытания +20 °С (а) и 0 °С (б)



**Рис. 5.** Характер разрушения ударных образцов стали 20ГЛ при температурах испытания  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)



**Рис. 6.** Характер разрушения ударных образцов стали 20ГЛ при температурах испытания  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)



**Рис. 7.** Макрорельеф поверхности ударного разрушения при температурах  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

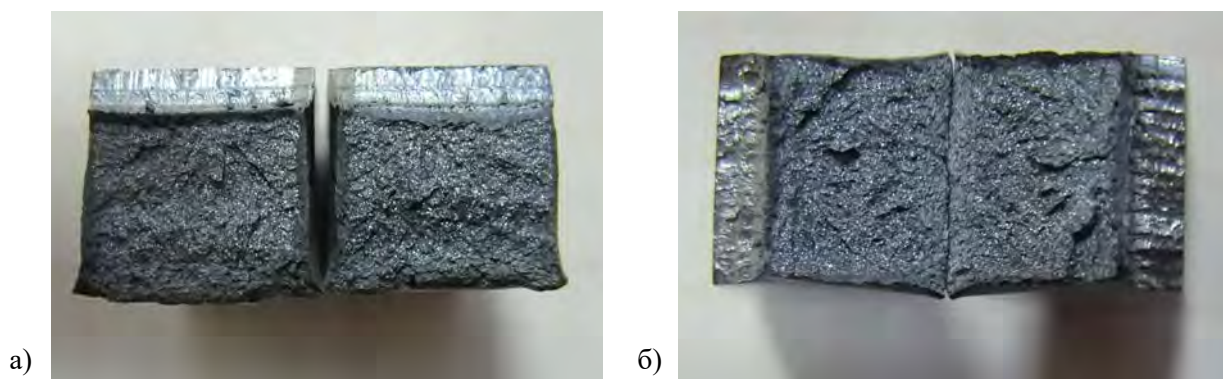


Рис. 8. Макрорельеф поверхности ударного разрушения при температурах  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

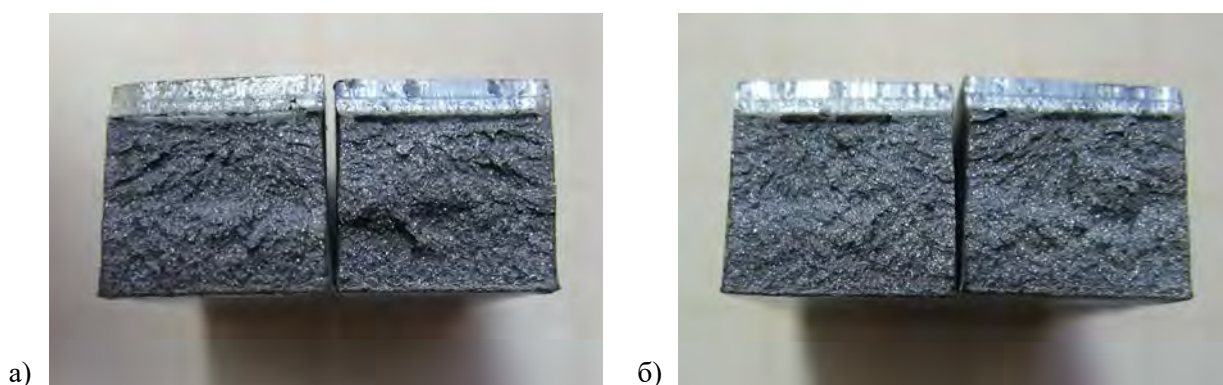


Рис. 9. Макрорельеф поверхности ударного разрушения при температурах  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

критическая температура хрупкости ТК, определяющая температурную границу, ниже которой не рекомендуется эксплуатировать изделия и элементы конструкции, изготовленные из данного материала.

Одним из основных показателей, используемых при определении величины критической температуры, является соотношение площадей областей, в которых реализуется вязкое и хрупкое разрушение.

В большинстве случаев в качестве критерияльной величины рекомендуется считать наличие 50% вязкой составляющей в изломе образца. На представленных фотографиях (рис. 7–9) этому условию отвечает диапазон температур в области  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, в качестве приближенной оценки за

критическую температуру хрупкости можно принять  $TК = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Заключение

На основании проведенных ударных испытаний балочных прямоугольных образцов с V-образным надрезом (тип 11 по ГОСТ 9454-78) из литой стали 20ГЛ в диапазоне температур  $+20\text{...}-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  можно сделать следующие выводы:

1. При понижении температуры испытания от  $+20$  до  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит изменение механизма разрушения: переход от вязкого к вязко-хрупкому и хрупкому механизмам разрушения.

2. На основании построенных зависимостей  $P = f(\tau)$  проведена приближенная вре-

менная оценка стадий зарождения и развития магистральной трещины. Показано, что при  $T > -20$  °С время распространения трещины превышает время, затрачиваемое на зарождение трещины. При  $T \leq -20$  °С время зарождения трещины превышает время ее распространения.

3. Проведен анализ изломов и характера разрушения ударных образцов. Установлено, что за величину критической температуры хрупкости в первом приближении может быть принята температура  $T_K = 0$  °С.

### Библиографический список

1. ГОСТ 32400-2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2013.

3. ГОСТ 32.183-2001. Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная. Технические условия. МПС России. М., 2001.

3. ГОСТ 9454-78. Металлы. Методы испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнат-

ных и повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1978.

Дата поступления: 28.01.2024

Решение о публикации: 01.03.2024

### Контактная информация:

ДАНИЛЕНКО Денис Викторович — руководитель департамента ООО «УК РМ РЕЙЛ» (Саранск, Россия); ddv051976@mail.ru

ЕФИМОВ Виктор Петрович — канд. техн. наук, доцент, генеральный директор ООО «УИЦ-Вагоны» (Нижний Тагил, Россия); uiz123456@mail.ru

ЧЕРНОВ Владимир Александрович — доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ «ПГУПС Императора Александра I» (Санкт-Петербург, Россия); chernov-nt@mail.ru

КОМИЧЕНКО Станислав Олегович — заместитель руководителя ИЦ АО «НВЦ «Вагоны» (Санкт-Петербург, Россия); stanislav.komichenko@nvc-vagon.ru

ЧЕРНОВА Татьяна Михайловна — инженер кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ «ПГУПС Императора Александра I» (Санкт-Петербург, Россия); chernova@pgups.ru

## Investigation of Impact Toughness of Cast Steel for Load-Bearing Parts of Freight Cars

**D. V. Danilenko<sup>1</sup>, V. P. Efimov<sup>2</sup>, V. A. Chernov<sup>3</sup>, S. O. Komichenko<sup>4</sup>, T. M. Chernova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> LLC “RM RAIL Management Company”, 11, Lodygina St., Saransk, Republic of Mordovia, 430006, Russia

<sup>2</sup> LLC “UIC – Wagons”, 22, Ordzhonikidze St., Office 28, Nizhny Tagil, Sverdlovsk Oblast, 622007, Russia

<sup>3</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>4</sup> JSC “Research and Development Center “Wagons”, 9, Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** Investigation of impact toughness of cast steel load-bearing parts of freight cars / Danilenko D. V., Efimov V. P., Chernov V. A., Komichenko S. O., Chernova T. M. // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 274–281. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-274-281



## Abstract

**Objective:** to conduct comprehensive experimental studies of the impact toughness of 20GL cast steel, which is used for the manufacture of load-bearing parts of freight cars. To obtain a serial diagram of the dependence of the impact toughness value on the test temperature. **Methods:** the method of mechanical testing of cast steel specimens under impact loading was used, which allows obtaining quantitative estimates of the material's ability to resist impact fracture at different temperatures (impact toughness tests). Micrographic analysis of the fracture surface was used to study the surface of impact fracture. **Results:** based on the results of tests of specimens made of 20GL cast steel, experimental dependences  $P = f(\tau)$ ;  $E = f(\tau)$  and a serial diagram (KCV — T) were constructed, which allow evaluating the performance of cast steel in the manufacture of load-bearing parts of cars for various climatic conditions of operation. **Practical significance:** the results obtained allow us to carry out work to improve the technological and service properties of cast load-bearing parts of freight cars.

**Keywords:** impact toughness of cast steel, cast load-bearing parts, freight car bogie.

## References

1. GOST 32400-2013. Side frame and bolster of cast bogies for railway freight cars. Technical conditions. M.: Standards Publishing House, 2013. (In Russian)
2. GOST 32.183-2001. Two-axle bogies for 1520 mm gauge freight cars. Cast parts. Side frame and bolster. Technical conditions. Ministry of Railways of Russia. M., 2001. (In Russian)
3. GOST 9454-78. Metals. Test methods for impact bending at low, room and elevated temperatures. M.: Standards Publishing House, 1978. (In Russian)

Received: 28.01.2024

Accepted: 01.03.2024

### Author's information:

Denis V. DANILENKO — Head of the Department of RM RAIL LLC (Saransk, Russia); ddv051976@mail.ru

Viktor P. EFIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor, General Director of UIC-Wagons LLC, (Nizhny Tagil, Russia); uiz123456@mail.ru

Vladimir A. CHERNOV — Associate Professor of the Department of “Wagons and Wagon Economy” FGBOU “Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University” (Saint Petersburg, Russia); chernov-nt@mail.ru

Stanislav O. KOMICHENKO — Deputy Head of the Research Center of JSC “NVTS “Wagons” (Saint Petersburg, Russia); stanislav.komichenko@nvc-vagon.ru

Tatyana M. CHERNOVA — Engineer of the Department of “Wagons and Wagon Economy” GBOU “Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University” (Saint Petersburg, Russia); chernova@pgups.ru



УДК 621.39

## Функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной и распределенной системы технологического назначения

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

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

**Для цитирования:** Канаев А. К., Опарин Е. В., Опарина Е. В. Функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной и распределенной системы технологического назначения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 282–289. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-282-289

### Аннотация

**Цель:** разработать научно-технические предложения и требования по построению источников синхросигналов и сообщений единого времени для комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в зависимости от требований в сигналах частотно-временного обеспечения и действующей архитектуры сети связи в рамках решения задачи построения единой системы синхронизации по фазе, времени и частоте в крупных территориально распределенных и промышленных системах технологического назначения. **Методы:** применяемые методы исследования включают основополагающие положения теории построения систем синхронизации, а также инфокоммуникационных систем и сетей. **Результаты:** предложена функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, включающая в свой состав полный набор элементов для выполнения функций синхронизации и доставки сигналов единого времени в существующих и перспективных сложных гетерогенных сетях с различной архитектурой и разнородным оборудованием, отличающаяся от существующих полным учетом существующих в настоящее время технологий доставки сигналов единого времени и частоты, причем как на основе коммутации пакетов, так и на основе коммутации каналов. Предложенная функциональная модель объединенного источника комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени позволит обоснованно подходить к проектированию средств передачи и доставки сигналов единого времени и частоты в разнообразных и разнородных сетях связи, учитывая все потребности в сигналах частотно-временного обеспечения и ограничения действующих сетей связи. **Практическая значимость:** применение источников сигналов единого времени и частоты, в основе которых лежит предложенная функциональная модель, позволит обеспечить гибкую инфраструктуру для обеспечения единства систем единого времени и тактовой сетевой синхронизации, необходимых для корректного функционирования оборудования связи; максимально удовлетворить требования в услугах сигналов синхронизации и сообщений единого времени для перспективных и действующих потребителей; обеспечить возможность поэтапного перехода построения сетей связи от технологий коммутации каналов к технологии коммутации пакетов за счет гибкости в использовании маршрутов и систем передачи, необходимых для распространения синхросигналов и сообщений единого времени.

**Ключевые слова:** тактовая сетевая синхронизация, система единого времени, частотно-временное обеспечение, телекоммуникационная система, комплексная система синхронизации, шкала времени.

## Введение

Поддержание синхронизации оборудования связи является важнейшим условием обеспечения его стабильности при функционировании в составе телекоммуникационных систем (ТКС). В настоящее время в современных сетях связи используются не только системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС), но также устройства систем единого времени (СЕВ). В связи с тем что происходит поэтапное изменение инфраструктуры ТКС, внедрение новых сетевых технологий, увеличение числа абонентов, возрастают также требования к системам передачи сигналов частотно-временного обеспечения (ЧВО), особенно это касается систем технологического назначения и промышленных систем [1–3]. Таким образом, в настоящее время актуальна задача формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени (КССДШВ), включающей в свой состав подсистемы ТСС и СЕВ. Ключевыми задачами КССДШВ являются формирование, хранение, передача и доставка до потребителей синхросигналов и сообщений единого времени необходимой стабильности и точности, что в целом будет способствовать укреплению устойчивости процесса функционирования всей телекоммуникационной системы. Важнейшими элементами указанной КССДШВ являются источники сигналов точного времени и частоты, которые способны оптимальным образом изменять свою конфигурацию под постоянно изменяющиеся и увеличивающиеся требования потребителей в условиях разнородных гетерогенных ТКС.

### Построение сетевой структуры разработанной комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

Проведенный системный анализ применяющихся в настоящее время средств тактовой

сетевой синхронизации и единого времени позволил сформировать следующую сетевую структуру КССДШВ (рис. 1).

Согласно разработанной сетевой структуре КССДШВ (рис. 1), в качестве эталонных источников синхросигналов и сообщений единого времени применяется инфраструктура Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли России (ГСВЧ). Далее в соответствии с необходимыми уровнями иерархии КССДШВ происходит подключение объединенных источников подсистем ТСС и СЕВ. В качестве оборудования подсистемы ТСС могут выступать первичные эталонные генераторы (ПЭГ), вторичные задающие генераторы (ВЗГ), местные задающие генераторы (МЗГ) и генераторы сетевых элементов (ГСЭ), а в качестве оборудования подсистемы СЕВ в зависимости от разновидностей используемых протоколов передачи сообщений времени выступают сервера времени необходимого уровня и узлы сетей связи, поддерживающие функционирование протоколов передачи сообщений времени.

К средствам передачи сигналов КССДШВ можно отнести в первую очередь волоконно-оптические системы передачи (ВОСП), а также аппаратуру ГНСС [1–3].

Основными действующими и перспективными потребителями услуг и сервисов КССДШВ являются технологические и промышленные сети связи, системы часофикации, электронного документооборота, АРМ, испытательная аппаратура [4, 5].

Заметим, что структура СЕВ является потребителем по отношению к подсистеме ТСС. Аппаратура тактовой сетевой синхронизации обеспечивает подсистему СЕВ высокостабильными синхросигналами частоты

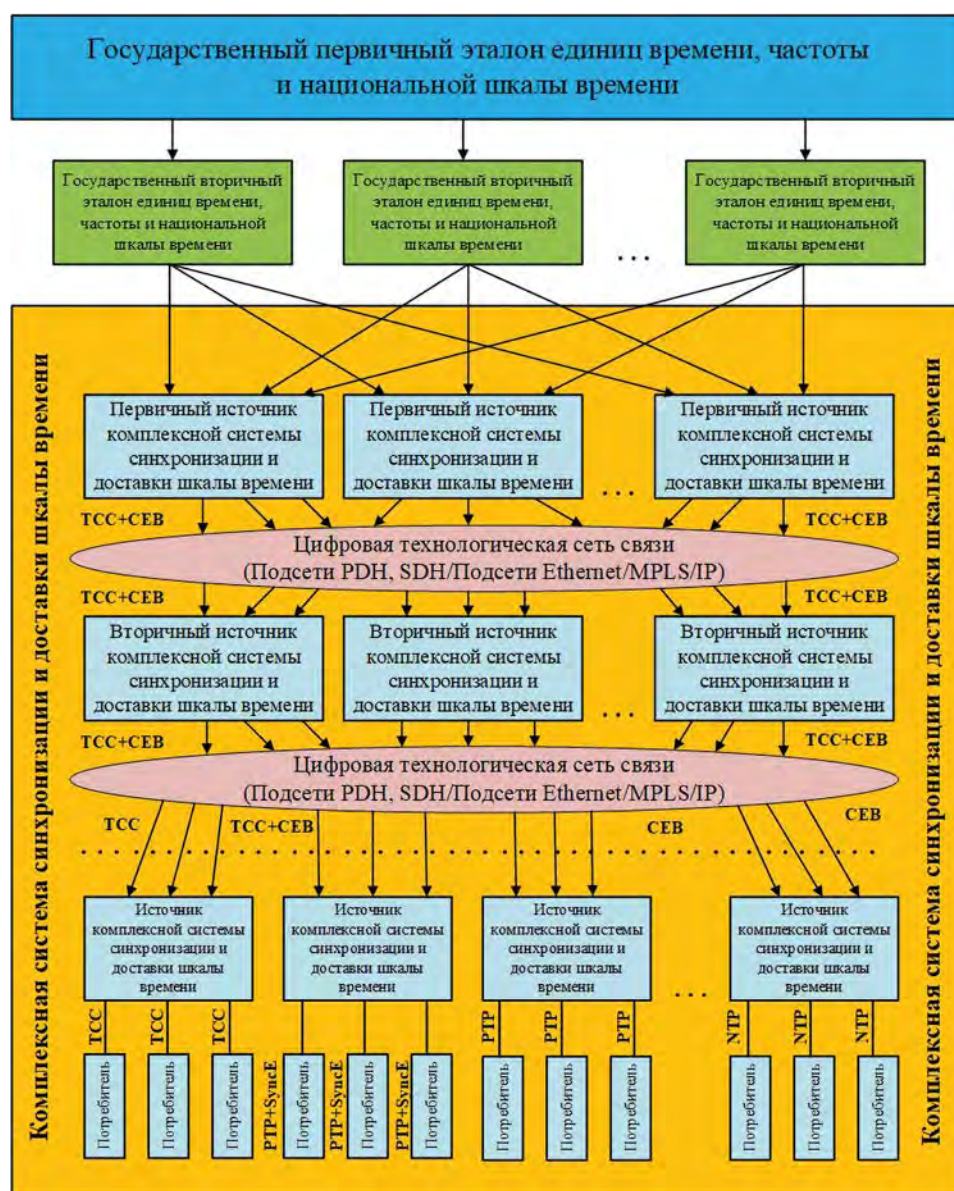


Рис. 1. Сетевая структура комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

с целью увеличения стабильности и точности параметров сигналов синхронизации времени [6–8].

#### Формирование функциональной модели объединенного источника КССДШВ

Основополагающими элементами в указанной сетевой структуре КССДШВ (рис. 1) являются источники сигналов

частотно-временного обеспечения различных уровней иерархии. Для оптимального построения КССДШВ источники должны обеспечивать в своем процессе функционирования полный набор сигналов времени и частоты в соответствии с уровнем в иерархии, быть гибкими, оперативно подстраиваемыми под изменяющиеся требования потребителей и сетевую архитектуру. Учитывая

указанные требования, функциональная модель объединенного источника КССДШВ будет иметь следующий вид (рис. 2).

Представленная функциональная модель источника (рис. 2) соответствует всем уровням иерархии в сетевой структуре КССДШВ. Данная функциональная модель в общем виде содержит следующие элементы. В первую очередь это модули входных и выходных сигналов единого времени и частоты. Учитывая тот факт, что реальные сети связи разнообразны по своей структуре и используемым технологиям, в состав объединенного источника КССДШВ предполагается включение следующих входных и выходных модулей, учитывая при этом их принадлежность к подсистеме ТСС и СЕВ:

- модуль приема сигналов единого времени со стороны ГНСС, в первую очередь ГЛОНАСС/GPS;
- модуль протокола точного времени RTP (IEEE 1588v2) [9];
- модуль протокола сетевого времени NTP [10, 11];
- модуль синхронного Ethernet SyncE [12, 13];

– модуль приема и передачи сигналов синхронизации по технологии СЦИ [14, 15].

Перечисленные технологии наиболее распространены для передачи сигналов единого времени и частоты, но в зависимости от конкретных условий возможно также и применение дополнительных модулей, таких как интерфейс IRIG, интерфейс TOD, интерфейс 1PPS, синхросигналы 5 МГц и 10 МГц и др.

Вторым важным элементом объединенного источника КССДШВ является схема сравнения и выбора поступающих сигналов единого времени и частоты в соответствии с показателями точности и стабильности. На основании вложенных в схему алгоритмов сравнения происходит выбор конкретного источника для подстройки частоты внутреннего генератора. Внутренний генератор также необходим для хранения текущего времени и формирования сигналов синхронизации в случае отсутствия входящих источников сигналов единого времени и частоты или же их качестве, несоответствующем нормативным значениям. Отметим, что время подстройки частоты внутреннего генератора

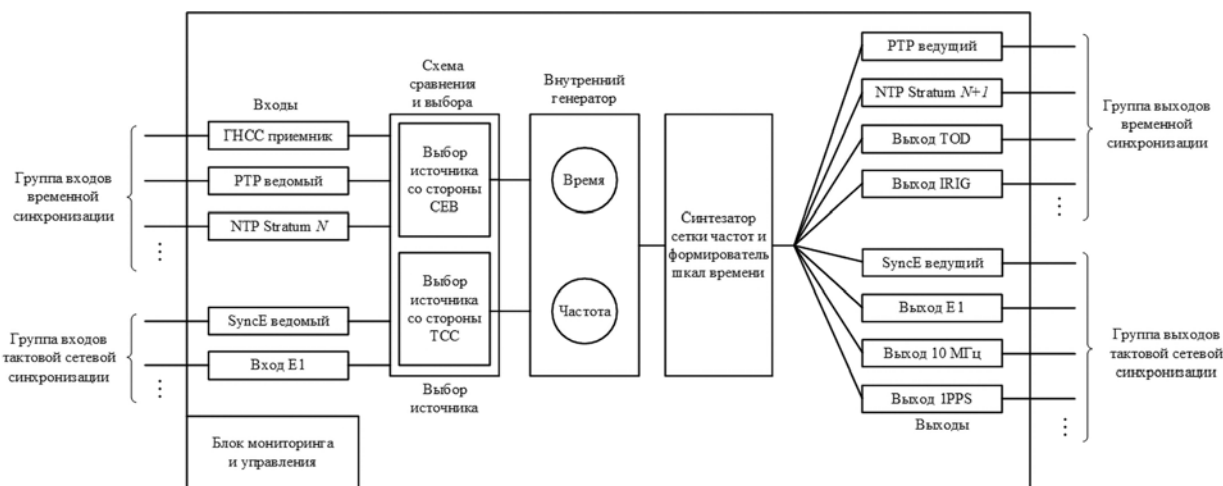


Рис. 2. Функциональная модель объединенного источника КССДШВ

и формирование шкалы времени зависит от выбранного входящего источника, а также от исходного режима работы оборудования.

Для формирования выходных сигналов частотно-временного обеспечения необходим синтезатор сетки частот в случае функционирования в подсистеме ТСС и формирователь шкал времени в случае функционирования в подсистеме СЕВ.

Для обеспечения процесса функционирования объединенного источника КССДШВ необходим также блок мониторинга и управления. При физической реализации устройства необходимы также элементы электропитания и взаимодействия с обслуживающим персоналом.

#### **Функционирование объединенного источника КССДШВ при различных режимах его работы**

В случае наличия модуля приема сигналов единого времени со стороны ГНСС данный модуль по сигналам спутниковых радионавигационных систем формирует шкалу времени в виде последовательности импульсов, а также информационное сообщение, привязывающее последовательность импульсов к используемой шкале времени. В случае потери сигнала от спутников формирование сигналов единого времени происходит от внутреннего генератора. Время подстройки внутреннего генератора при использовании модуля ГНСС не является постоянным. Оно зависит от количества спутников, уровня поступающего сигнала, технических характеристик конкретного экземпляра внутреннего генератора и других условий.

Модуль протокола NTP принимает запросы от клиентов и формирует сообщения с точным текущим временем. В общем случае при этом возможны следующие ре-

жимы функционирования «Клиент/сервер», симметричный активный/пассивный, широковещательный режим Broadcast, Multicast, Manycast.

Модуль протокола RTP обеспечивает обмен данными в соответствии с положениями IEEE 1588v2.

Модуль приема и передачи сигналов синхронизации по технологии СЦИ предназначен для приема и формирования сигналов 2.048 МГц или 2.048 Мбит/с в режиме приема или передачи сигнала с поддержкой SSM. Качественные показатели низкочастотного шума в выходном сигнале определяются через МОВИ и ДВИ.

Модуль приема и передачи сигналов синхронизации с применением технологии синхронного Ethernet SyncE обеспечивает доставку синхросигналов в сетях передачи данных, используя потоки Ethernet.

Дополнительные модули обеспечивают прием и передачу сигналов частотно-временного обеспечения в соответствии с алгоритмами своего функционирования.

Блок мониторинга и управления постоянно отслеживает состояние параметров функционирования объединенного источника КССДШВ, в том числе состояние алгоритма подстройки, уровень (точность) подстройки выходной частоты генератора; текущее абсолютное значение разности фаз между выходной частотой внутреннего генератора и источником синхросигнала, наличие синхросигнала на выходе модулей, режимы функционирования модулей, их конфигурацию, а также дополнительные параметры, необходимые для качественного функционирования устройства.

Отметим, что процесс функционирования объединенного источника КССДШВ во многом определяется состоянием внутреннего

генератора, который может функционировать в режиме прогрева, подстройки, захвата, удержания или свободных колебаний, также значительное влияние оказывает качество входных сигналов и состояние антенны ГЛОНАСС/GPS.

Таким образом, построена функциональная модель объединенного источника КССДШВ, в составе которой учтены все элементы, необходимые для эффективного формирования необходимых сигналов частотно-временного обеспечения в соответствии с запросами потребителей и текущей архитектурой телекоммуникационной системы.

### Заключение

На основании требований к перспективной КССДШВ сформирована функциональная модель объединенного источника сигналов частотно-временного обеспечения. Данная модель позволяет при ее реализации формировать элементы КССДШВ, способные обеспечить сигналами синхронизации и единого времени полный перечень потребителей в независимости от применяемых технологий доставки сигналов ЧВО и архитектуры сети связи. Отличительной особенностью данной модели является способность учета всех технологий формирования и доставки сигналов ЧВО, а также модульность построения конкретных экземпляров источников сигналов ЧВО в зависимости от конкретных условий применения.

Разработанная функциональная модель объединенного источника КССДШВ позволит обоснованно подходить к выбору и построению средств и способов передачи и доставки синхросигналов и сообщений единого времени в сложных гетерогенных телекоммуникационных системах.

### Библиографический список

1. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия. Телеком, 2021. 270 с.
2. Бирюков Н. Л., Триска Н. Р., Худынцев Н. Н. Обзор направлений исследований МСЭ в области частотно-временного обеспечения современных сетей связи // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8, № 2. С. 12–17.
3. Канаев А. К., Тощев А. К. Рекомендации МСЭ-Т в области синхронизации инфотелекоммуникационных систем. Автоматика, связь, информатика. 2018. № 10. С. 8–14.
4. Давыдкин П. Н., Колтунов М. Н., Рыжков А. В. Тактовая сетевая синхронизация. М.: Эко-Трендз, 2004. 205 с.
5. Мазуренко Д. К. Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов // Т-Comm. Телекоммуникации и Транспорт. 2017. Т. 11, № 8. С. 4–8.
6. Коган С. Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на оптическом транспортном уровне. Часть 1. Общие требования к синхронизации сетей мобильной (сотовой) связи 5G // Первая миля. 2022. № 4. С. 50–59.
7. Коган С. Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне. Часть 2. Сетевая синхронизация по тактовой частоте // Первая миля. 2022. № 5. С. 44–58.
8. Коган С. Сети 5G: распределение сигналов синхронизации на сетевом оптическом транспортном уровне. Часть 3. Сетевая синхронизация по фазе/времени // Первая миля. 2022. № 6. С. 42–53.
9. IEEE 1588–2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
10. IETF RFC 1305 Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis.
11. IETF RFC 5905 Network Time Protocol Version 4 : Protocol and Algorithms Specification.

12. Рекомендация МСЭ-Т G.8261/Y.1361: «Синхронизация и аспекты синхронизации в пакетных сетях» (29.08.2019).

13. Рекомендация МСЭ-Т G.8265.1/Y.1365.1: «Профиль протокола точного времени для синхронизации по частоте» (29.06.2021).

14. Рекомендация МСЭ-Т G.823: «Контроль дробления и блуждания в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 Кбит/с» (10.03.2000).

15. Рекомендация МСЭ-Т G.803: «Архитектура транспортных сетей, основанная на синхронной цифровой иерархии (СЦИ)» (10.03.2000).

Дата поступления: 15.01.2024

Решение о публикации: 14.02.2024

#### Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — докт. техн. наук, профессор; kanaevak@mail.ru

ОПАРИН Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, доцент; ОпаруН@mail.ru

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доцент; syrayaekaterina@mail.ru

## The functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale for a large and distributed technological purpose system

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

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

**For citation:** Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. The functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale for a large and distributed technological purpose system // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 282–289. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-282-289

### Abstract

**Purpose:** to develop scientific and technical proposals and requirements for building sources of synchrosignals and messages of a single time for the integrated system of synchronization and delivery of the time scale depending on the requirements in frequency-time support signals and the current communication chain architecture in the framework of solving a unified synchronization system in phase, time and the frequency in large territorially distributed and industrial technological systems. **Methods:** the applied research methods include the fundamental provisions of the theory of constructing synchronization systems, as well as infocommunication systems and networks. **Results:** a functional model of a united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale, which includes a complete set of elements to perform the functions of synchronization and delivery of single-time signals in existing and promising complex heterogeneous networks with various architecture and heterogeneous equipment that differs from the existing fully taking into account the existing ones in Currently, technologies for delivery of single time and frequency signals, both on the basis of switching packages and on the basis of switching of channels. The proposed functional model of the united source of the integrated system of synchronization and delivery of the time scale will allow to reasonably approach the design of the means of transmitting and delivering single time and frequency signals to various and heterogeneous communication networks, taking into account all the needs for frequency-time support signals and limiting existing communication networks. **Practical significance:** the use of sources of single-time and frequency signals, which are based on the proposed functional model, will ensure a flexible infrastructure to ensure the unity of the unity of the unified time and clock network synchronization necessary for the correct



functioning of communication equipment; Satisfy the requirements of synchronization signals and uniform messages for promising and existing consumers as much as possible; ensure the possibility of a phased transition of the construction of communication networks from the technologies of the channels to the technology of switching packages due to flexibility in the use of routes and transmission systems necessary for the spread of synchronsignals and uniform messages.

**Keywords:** clock network synchronization, a single time system, frequency and temporal support, telecommunication system, complex synchronization system, time scale.

## References

1. Ryzhkov A. V. Chastotno-vremennoe obespechenie v setjah jelektronsvjazi. Uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: Gorjachaja linija. Telekom, 2021. 270 s. (In Russian)
2. Birjukov N. L., Triska N. R., Hudyncev N. N. Obzor napravlenij issledovanij MSJe v oblasti chastotno-vremennogo obespechenija sovremennyh setej svjazi // T-Comm. Telekommunikacii i transport. 2014. T. 8, № 2. S. 12–17. (In Russian)
3. Kanaev A. K., Toshhev A. K. Rekomendacii MSJe-T v oblasti sinhronizacii infotelekkommunikacionnyh sistem. Avtomatika, svjaz', informatika. 2018. № 10. S. 8–14. (In Russian)
4. Davydkin P. N., Koltunov M. N., Ryzhkov A. V. Taktovaja setevaja sinhronizacija. M.: Jeko-Trendz, 2004. 205 s. (In Russian)
5. Mazurenko D. K. Aspekty postroenija sistemy chastotno-vremennoj setевой sinhronizacii signalov // T-Comm. Telekommunikacii i Transport. 2017. T. 11, № 8. S. 4–8. (In Russian)
6. Kogan C. Seti 5G: raspredelenie signalov sinhronizacii na opticheskom transportnom urovne. Chast' 1. Obshhie trebovanija k sinhronizacii setej mobil'noj svjazi 5G // Pervaja milja. 2022. № 4. S. 50–59. (In Russian)
7. Kogan C. Seti 5G: raspredelenie signalov sinhronizacii na setevom opticheskom transportnom urovne. Chast' 2. Setevaja sinhronizacija po taktovoj chastote // Pervaja milja. 2022. № 5. S. 44–58. (In Russian)
8. Kogan C. Seti 5G: raspredelenie signalov sinhronizacii na setevom opticheskom transportnom urovne. Chast' 3. Setevaja sinhronizacija po faze/vremeni // Pervaja milja. 2022. № 6. S. 42–53. (In Russian)
9. IEEE 1588–2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
10. IETF RFC 1305 Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis.
11. IETF RFC 5905 Network Time Protocol Version 4 : Protocol and Algorithms Specification.
12. Rekomendacija MSJe-T G.8261/Y.1361: “Sinhronizacija i aspekty sinhronizacii v paketnyh setjah” (29.08.2019). (In Russian)
13. Rekomendacija MSJe-T G.8265.1/Y.1365.1: “Profil' protokola tochnogo vremeni dlja sinhronizacii po chastote” (29.06.2021). (In Russian)
14. Rekomendacija MSJe-T G.823: “Kontrol' drozhanija i bluzhdanija v cifrovych setjah, osnovannyh na ierarhii 2048 Kbit/s” (10.03.2000). (In Russian)
15. Rekomendacija MSJe-T G.803: “Arhitektura transportnyh setej, osnovannaja na sinhronnoj cifrovoj ierarhii (SCI)” (10.03.2000). (In Russian)

Received: 15.01.2024

Accepted: 14.02.2024

### Author's information:

Andrew K. KANAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; kanaevak@mail.ru

Evgeniy V. OPARIN — PhD in Engineering, Associate Professor; OnapuH@mail.ru

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor; syrayaekaterina@mail.ru

УДК 654.07

## **Модель информационно-телекоммуникационного взаимодействия между автоматизированными транспортными средствами в условиях неполного покрытия мобильными сетями**

**А. Р. Андреева<sup>1,2</sup>, Р. П. Сорокин<sup>2</sup>, М. А. Сахарова<sup>1,2</sup>, И. В. Захаров<sup>1,2</sup>**

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

<sup>2</sup> Закрытое акционерное общество «Институт телекоммуникаций», Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 5, к. 5 литера М

**Для цитирования:** Андреева А. Р., Сорокин Р. П., Сахарова М. А., Захаров И. В. Модель информационно-телекоммуникационного взаимодействия между автоматизированными транспортными средствами в условиях неполного покрытия мобильными сетями // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 290–304. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-290-304

### **Аннотация**

С целью повышения безопасности, а также оптимизации пути движения в повседневной жизни для сокращения времени в дороге в настоящее время появляется все больше предпосылок внедрения высокоавтоматизированных и полностью автоматизированных транспортных средств в различные сферы жизни человека. Это позволит оптимизировать и усовершенствовать дорожную систему страны в целом, а самое главное, снизить аварийность и, следовательно, повысить безопасность дорожного движения. При внедрении данных транспортных средств необходимо разработать алгоритм связи между различными участниками дорожного движения при различных условиях и расстояниях между объектами. **Методы:** в данном исследовании использованы методы имитационного моделирования, метод табличного и графического отображения данных, метод факторного анализа, методы модельного эксперимента, а также метод экспертных оценок. **Результаты:** в рамках работы разработаны алгоритм передачи сообщений с различной по содержанию и приоритету информацией между двумя высокоавтоматизированными / полностью автоматизированными транспортными средствами либо транспортное средство с автоматизированной государственной инфраструктурой с применением различных каналов связи, а также основанная на нем имитационная модель, которая была создана в среде моделирования AnyLogic. Применение различных приоритетов позволяет гарантировать минимальное время доставки наиболее важных сообщений, содержащих информацию для управления ТС. В результате проведения моделирования получены гистограммы вероятностно-временных характеристик передачи сообщений различного приоритета и сообщений, подтверждающих их доставку, при использовании различных каналов связи. **Практическая значимость:** результаты моделирования дают возможность оценить качество и время доставки сообщений в заданных условиях и обеспечить эффективную передачу информации с помощью изменения интенсивностей и размеров сообщений, применения различных каналов связи и их скоростей и так далее.

**Ключевые слова:** автоматизация, транспортное средство, имитационное моделирование, канал связи, цифровизация, автоматизированное транспортное средство, сеть связи.

## Введение

В 2021 году Министерство транспорта приступило к воплощению стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли, в которую входят шесть основных направлений, а именно: «Беспилотники для пассажиров и грузов», «Зеленый цифровой коридор пассажира», «Бесшовная грузовая логистика», «Цифровое управление транспортной системой Российской Федерации», «Цифровизация для транспортной безопасности», «Цифровые двойники объектов транспортной инфраструктуры» [1].

Цифровизация транспортной отрасли может помочь преодолеть следующие вызовы: снизить аварийность из-за человеческого фактора, повысить эффективность перевозочного процесса, легализовать «серые» перевозки, упростить бюрократическую часть перевозок, повысить скоординированность и информированность местных/региональных/федеральных органов, осуществлять мониторинг за состоянием транспортной инфраструктуры, осуществить бесшовность при смене видов транспорта.

## Внедрение высокоавтоматизированных и полностью автоматизированных транспортных средств

Одним из решений стратегии является постепенное введение высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) и полностью автоматизированных транспортных средств (ПАТС) в сфере наземного транспорта.

Всего существует шесть уровней автоматизации транспортного средства: L0 — нет автоматизации; L1 — помощь водителю, конкретные функции под контролем; L2 — частичная автоматизация, автоматизация комбинированных функций (например, адаптивный

круиз-контроль); L3 — условная автоматизация: автоматизация всех важных функций с ограничениями (ограниченное самоуправление); водитель должен иметь возможность постоянно контролировать управление; L4 — высокая автоматизация: транспортное средство выполняет все задачи вождения при определенных условиях; водитель может взять управление на себя; L5 — полная автоматизация: транспортное средство выполняет все задачи вождения в любых условиях, водитель может взять управление на себя. Большинство крупных производителей автомобилей объявили о выпуске автомобилей L4+ в ближайшее время [2, 3].

В соответствии с ГОСТ Р 70249-2022 ВАТС — это транспортное средство, оснащенное автоматизированной системой вождения, которая действует в пределах конкретной среды штатной эксплуатации применительно к некоторым или всем поездкам без необходимости вмешательства человека в качестве запасного варианта обеспечения безопасности дорожного движения [4].

Согласно Распоряжению Правительства РФ от 25.03.2020 № 724-р «О Концепции обеспечения безопасности дорожного движения с участием беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования». ПАТС — это транспортное средство, оснащенное автоматизированной системой вождения, которая действует без каких бы то ни было ограничений среды штатной эксплуатации применительно к некоторым или всем поездкам без необходимости вмешательства человека в управление для обеспечения безопасности дорожного движения [5].

Предпосылками к организации умной транспортной системы являются главные

проблемы дорог больших городов — образование дорожных пробок. Ремонтные работы, ДТП и иные непривычные для людей ситуации на дороге вызывают множество сложностей как для водителей, так и для служб, которые стараются решить данные проблемы [6].

Существует большое количество достоинств ввода ВАТС и ПАТС в эксплуатацию, в том числе: повышение безопасности дорожного движения, снижение негативного влияния на окружающую среду, снижение длительности перевозок и цен на них, повышение эффективности движения и др. [7].

Для создания дорожной системы с ВАТС/ПАТС должны быть выполнены следующие условия: в составе ТС должна находиться мощная вычислительная платформа, которая обрабатывает данные с максимальной производительностью в реальном времени; должны быть предусмотрены надежные центры обработки данных; должна осуществляться комплексная безопасность — от дверных замков до центра обработки данных, от бортовых процессоров в автомобиле до серверов в облаке/центре обработки данных [8].

Система управления ВАТС/ПАТС должна обеспечивать прием и передачу управляющего сигнала, сбор информации с различных сенсоров (радары, лидары, видеокамеры и т. д.), обработку полученной информации. Также необходимо обеспечить выполнение функций, соответствующих технике с низкой степенью автоматизации (торможение, повороты и т. д.).

Вычисления в устройствах, расположенных в ВАТС/ПАТС, должны решать следующие задачи: определение препятствий по маршруту, определение маршрута движения с обновлением в зависимости от дорожной ситуации в реальном времени, взаимодей-

ствие с другими ВАТС/ПАТС, передача информации пользователям и пассажирам и т. п.

При масштабном применении ВАТС и ПАТС необходимо обеспечить связь транспортных средств в потоке между собой, а также со стационарными объектами (например, дорожные знаки и центры обработки информации). В различных условиях и расстояниях между двумя объектами возможно использование следующих видов связи: Bluetooth, GSM, Wi-Fi, УКВ и др.

На рис. 1 показана ситуация на дороге с условием, что в данном месте происходит обмен информацией только непосредственно между транспортными средствами. В случае а) при произошедшей чрезвычайной ситуации на дороге (ДТП, съезд в кювет, ремонт дороги и т. д.) остальные ТС получают данную информацию, например по GSM-сети, а если она недоступна, то по Bluetooth или Wi-Fi. Так как ВАТС/ПАТС находятся на небольших расстояниях друг от друга и имеют возможность заранее объехать, не создавая помехи друг для друга. Также имеется возможность оповещения ДПС и других служб, которые получают точные координаты происшествия, в данном случае, что происшествие случилось возле 327 км трассы. В случае б) автомобили находятся на значительном расстоянии друг от друга, а значит, невозможно использовать Bluetooth или Wi-Fi, тогда данные могут быть переданы по УКВ-каналу.

При эксплуатации ВАТС/ПАТС от данных средств должна быть предусмотрена передача информации различного приоритета. В данной работе предложено 4 приоритета: 1 — аварийные сообщения и сообщения прямого управления ТС; 2 — сообщения о транспортных событиях и инцидентах

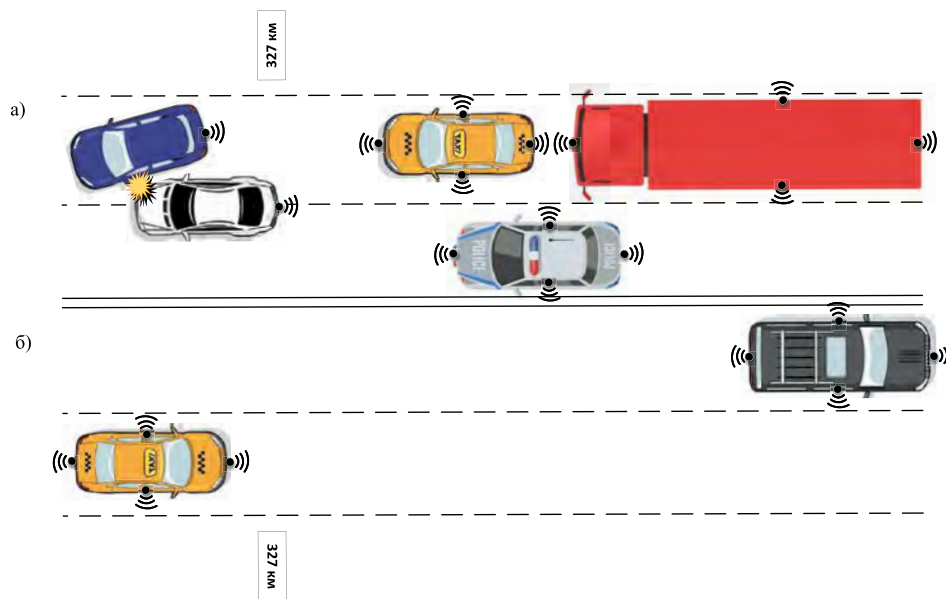


Рис. 1. Взаимодействие ВАТС/ПАТС

в радиусе зоны 2–3 км; 3 — сообщения взаимодействия с дорожной и городской инфраструктурой, 4 — информационное обеспечение ТС и пассажиров (сведения о кафе, магазинах, больницах и т. д.).

#### Моделирование информационно-телекоммуникационного взаимодействия между автоматизированными транспортными средствами

Целью моделирования является получение вероятностно-временных характеристик времени передачи сообщений и сообщений, подтверждающих доставку, различного приоритета при применении разнообразных каналов связи. Это позволит определить режимы движения ВАТС/ПАТС с учетом возможностей средств связи.

В результате анализа возможных средств и средств моделирования [9] в данной работе выбрана среда AnyLogic. Программное обеспечение характеризуется современным графическим интерфейсом, а также позволяет

использовать язык Java для разработки моделей. Важным достоинством AnyLogic является высокая гибридность и масштабируемость разрабатываемых моделей [10].

На рис. 2 представлена разработанная дискретно-событийная модель (ДСМ) передачи сообщения от ВАТС/ПАТС 1 до ВАТС/ПАТС 2/ГИА, которая включает в себя основные этапы передачи сообщений, в том числе: источники сообщений различных приоритетов, преобразование файлов в пакеты, подготовку пакетов к отправке, передачу по каналу, вероятность передачи без ошибок с задержкой на повторную передачу, время на обработку сигнала, прием сообщения и обработку полученных сообщений.

Размеры сообщений разного приоритета не одинаковы, поскольку сообщения 1 приоритета, то есть сообщения управления ТС, в том числе в различных чрезвычайных ситуациях, нужно доставить максимально быстро, а значит, их размер должен быть минимален. Сообщения 2 приоритета, содержащие

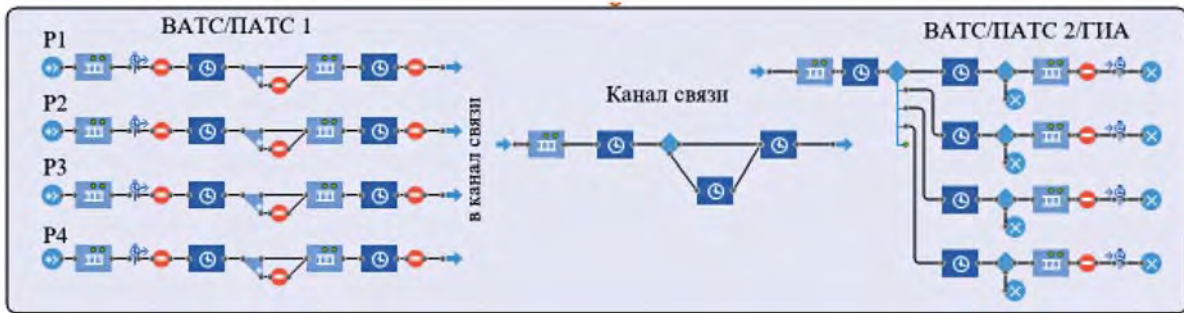


Рис. 2. Дискретно-событийная модель передачи сообщений

информацию об инцидентах и событиях на дороге, характеризуются большим количеством информации, а соответственно, и размером. Поскольку ВАТС/ПАТС являются динамичными объектами, происходит частый обмен информацией с городской инфраструктурой, содержащейся в сообщениях 3 приоритета. Сообщения 4 приоритета не передают критически важной информации, поэтому могут содержать большой объем данных, интенсивность которых может быть увеличена при необходимости по запросу пассажиров. Размер и интенсивность сообщений различного приоритета представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Размер и интенсивность сообщений различного приоритета

Приоритет	Интенсивность генерации сообщений, $\lambda_i$ , сообщение/час	Средний размер пакета, $R_i$ , байт
1 приоритет	60	10
2 приоритет	50	40
3 приоритет	10–100	250
4 приоритет	50	600

При выполнении данного моделирования возможны искажения сообщений с вероятностью 0,05, которые приводят к повторной передаче, характеристики антенн и приемопередатчиков не учитываются. В результате моделирования определяются временные значения передачи информации различных

приоритетов от источника (ВАТС/ПАТС 1) до потребителя (ВАТС/ПАТС 2/ГИА), а также сообщений, подтверждающих доставку, в обратном направлении (опционально) при выборе различных каналов связи.

Представленная на рис. 2 ДСМ имитирует передачу сообщения от источника к потребителю и состоит из трех основных блоков, а именно: ВАТС/ПАТС 1, ВАТС/ПАТС 2/ГИА и канал связи между ними, характеристики которого задаются перед началом моделирования.

Первоначально в источнике происходит генерация сообщений различного приоритета (интенсивность данных сообщений представлена в табл. 1), осуществляя часть алгоритма, показанную на рис. 3.

Выбор канала происходит в зависимости от обстановки и его доступности, например, в городских территориях целесообразна передача через сеть GSM. На территориях, где покрытие данной сети непостоянно, а взаимодействующие объекты находятся на расстоянии друг от друга не более 50 метров, возможно применение каналов Wi-Fi. При увеличении расстояния и недоступности GSM-сети используется УКВ-канал связи.

Следующая часть алгоритма (рис. 4) происходит в приемнике сообщений (ВАТС/ПАТС 2/ГИА), в том числе следующие процедуры: прием полученных пакетов и опре-

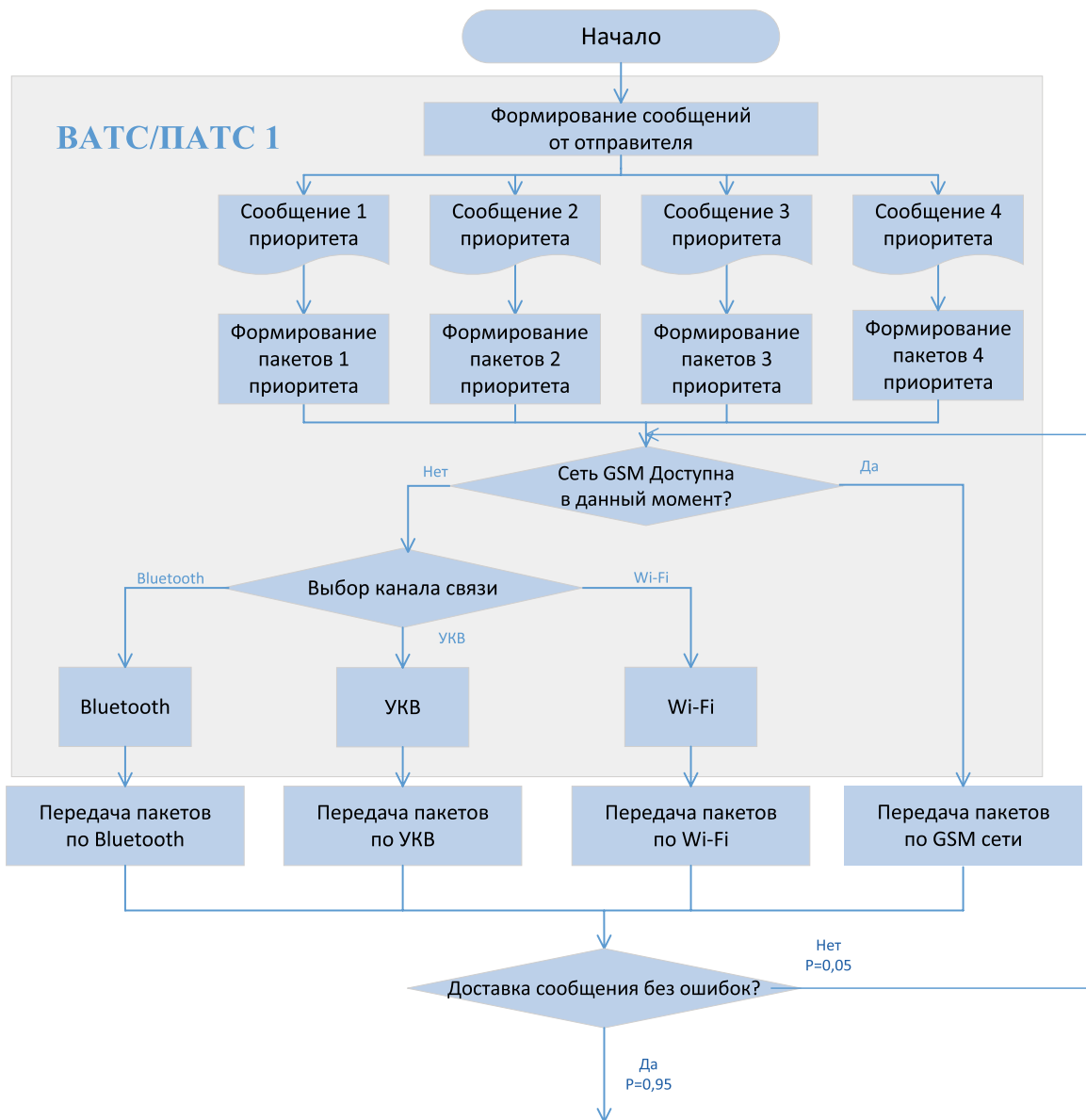
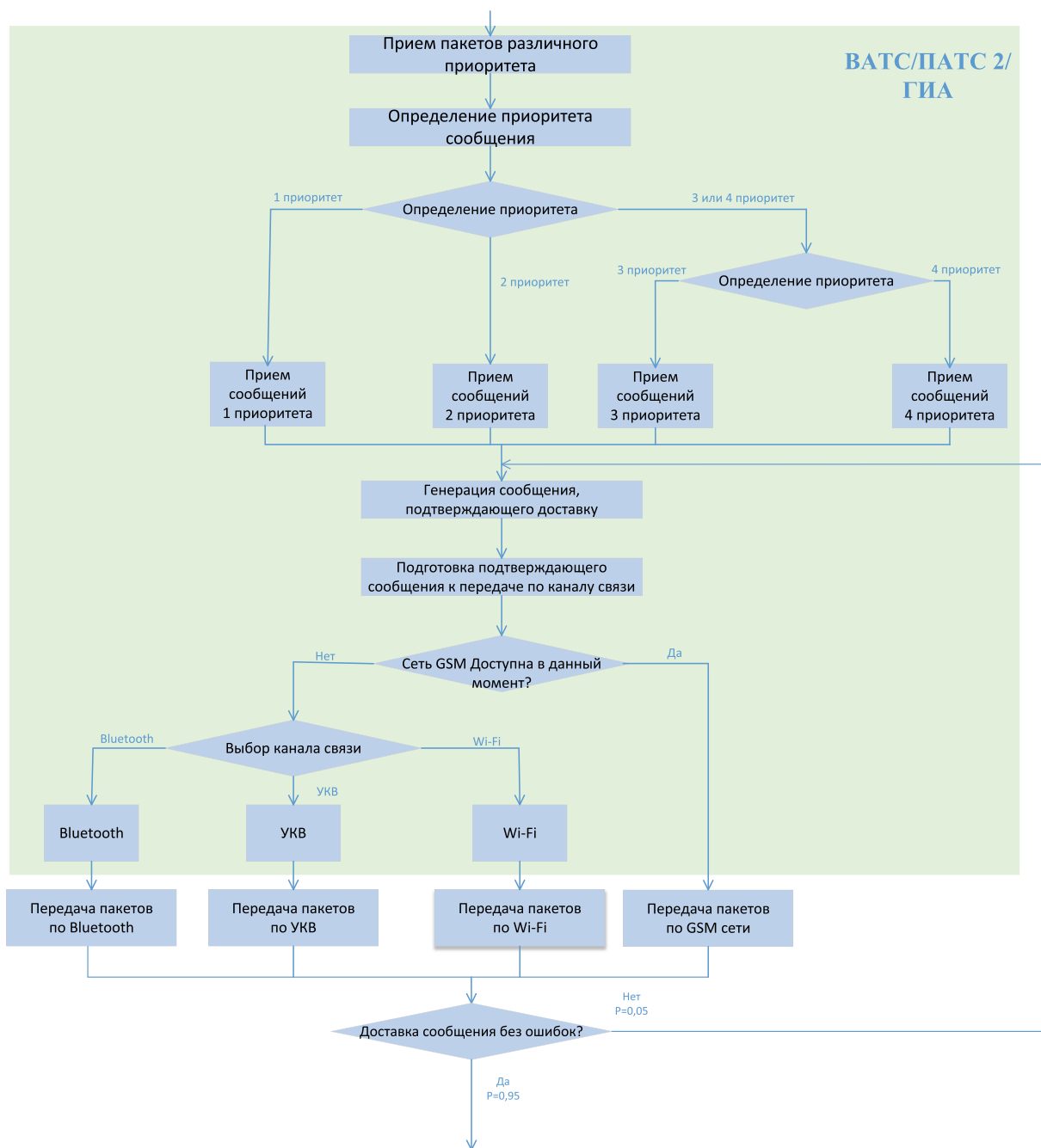


Рис. 3. Начало алгоритма передачи сообщений

деление их приоритета, а также генерация сообщений, подтверждающих доставку, и выбор канала для его дальнейшей передачи, если это необходимо. Канал передачи сообщений, подтверждающих доставку, в рамках данного моделирования совпадает с каналом, выбранным при передаче сообщения. Важной особенностью является то, что приоритет сообщений, подтверждающих доставку, совпадает с приоритетом сообщения.

ДСМ передачи сообщений, подтверждающих доставку (рис. 5), также состоит из трех основных блоков, важным отличием является то, что сообщения, подтверждающие доставку сообщений 3 и 4 приоритета, по приоритету совпадают. Основные этапы передачи сообщений, подтверждающих доставку, идентичны передаче сообщений.

После получения сообщений, подтверждающих доставку, при условии, что она



**Рис. 4.** Продолжение алгоритма передачи сообщений



подтверждает успешную доставку сообщения, копия данного сообщения удаляется из буфера (окончание алгоритма показано на рис. 6).

Для проведения экспериментов необходимо задать вероятностные временные значения процессов, которые происходят в данной модели. Характеристики и их значения приведены в табл. 2.

При доступности GSM-сети связь обеспечивается через нее, так как данная технология имеет высокий уровень качества связи, высокую защищенность за счет алгоритмов, а также доступность и возможность использования роуминговой связи (перемещение из одной сети в другую без потери присвоенного номера). Поэтому основная часть моделирования будет производиться через

канал связи GSM. Для начала рассмотрим время доставки сообщений и сообщений, подтверждающих доставку, различного приоритета при следующих исходных данных: значения размеров и интенсивностей сообщений приведены в табл. 1, интенсивность 3 приоритета выбрана 20 сообщений/час, то есть при небольшой скорости движения ТС, а значит, и нечастом обмене с ГИА, канал связи — GSM (270 Кбит/с). На рис. 7 представлены гистограммы времени передачи сообщений различного приоритета.

Для оценки изменения времени передачи сообщений от различных приоритетов сообщения заданы интенсивности всех приоритетов 10 сообщений/час, результаты моделирования представлены на рис. 8 (канал связи GSM).

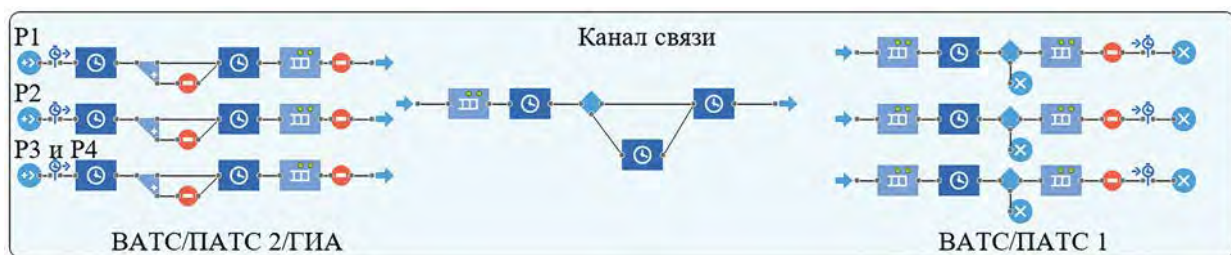


Рис. 5. Дискретно-событийная модель передачи сообщений, подтверждающих доставку

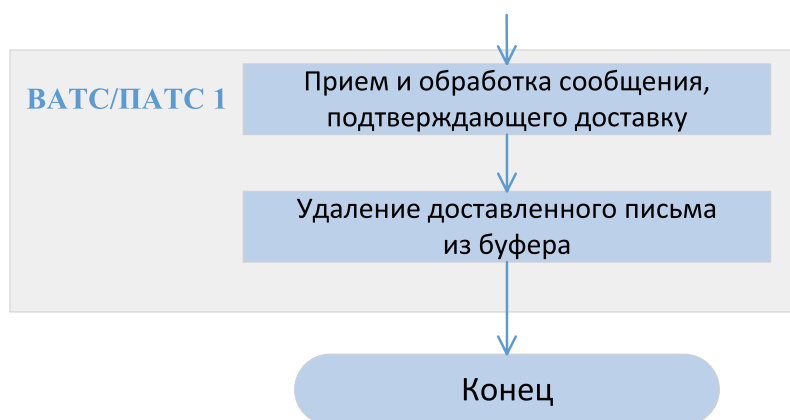


Рис. 6. Окончание алгоритма передачи сообщений

ТАБЛИЦА 2. Характеристики ДСМ

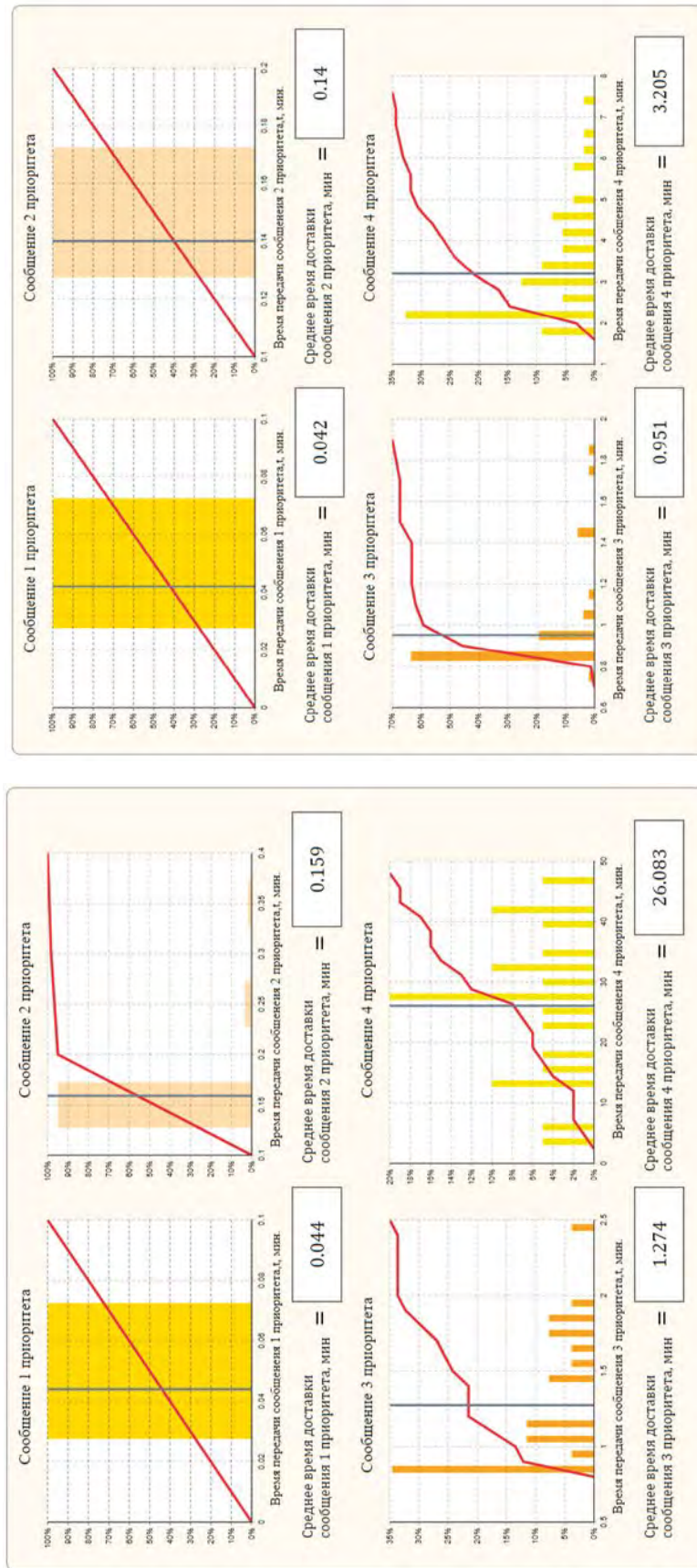
Характеристика	Значение
<b>Передача и прием сообщения</b>	
Преобразование файла в пакеты	0.05 с
Подготовка пакетов к отправке	prep (0.03, 0.06, 0.09), с
Передача по каналу	PacketSize/Speed, с
Вероятность передачи без ошибок	0.95
Задержка на повторную передачу	0.05 + prep (0.04, 0.07, 0.1) + PacketSize/Speed, с
Время на обработку сигнала	normal(0.1, 0.2), с
Прием сообщения	0.05 с
Обработка полученного сообщения	prep (0.03, 0.06, 0.09), с
<b>Передача и прием сообщений, подтверждающих доставку</b>	
Преобразование файла в пакеты	0.05 с
Подготовка пакетов к отправке	1 с
Передача по каналу	PacketSize/Speed, с
Вероятность передачи без ошибок	0.95
Задержка на повторную передачу	0.05 + prep (0.04, 0.07, 0.1) + PacketSize/Speed, с
Время на обработку сигнала	normal (0.1, 0.2), с
Прием сообщения, подтверждающего доставку	0.3 с

На рис. 9 представлена зависимость времени передачи сообщения 3 приоритета при изменении интенсивности от 10 до 100 сообщений/час при оставшихся прежними значениях параметров, то есть при наличии фонового трафика 1, 2 и 4 приоритета. Было отмечено, что при изменении интенсивности 3 приоритета до 70 сообщений/час и выше наблюдается повышенная занятость каналов связи, что существенно увеличивает время доставки сообщения 4 приоритета и сообщений, подтверждающих доставку, 3 и 4 приоритетов.

Как было написано ранее, при недоступности GSM-сети, например, в удаленных районах и за городом, возможно применение других каналов связи. Ниже, на рис. 10, представлены гистограммы времени передачи сообщений при использовании УКВ-канала со

следующими входными параметрами: значения размеров и интенсивности сообщений приведены в табл. 1, интенсивность 3 приоритета выбрана 20 сообщений/час, скорость канала связи — 8192 бит/с.

Для удобства сравнения результатов использования GSM-канала (рис. 7) и УКВ-канала (рис. 10) на рис. 11 приведена гистограмма среднего времени передачи сообщений различного приоритета. Время доставки сообщений через канал УКВ во всех случаях отличается большей длительностью, это связано с тем, что скорость передачи в данном канале в разы ниже, чем в канале GSM-сети. При высоких приоритетах (1 и 2 приоритет) сообщений при использовании GSM- и УКВ-каналов время отличается в среднем в 1,5 раза, при низших приоритетах (3 и 4 приоритет) — в 2,3 раза.



**Рис. 8.** Результаты моделирования при использовании GSM-канала и одинаковых интенсивностях сообщений разных приоритетов

**Рис. 7.** Результаты моделирования при использовании GSM-канала и различных интенсивностях сообщений разных приоритетов

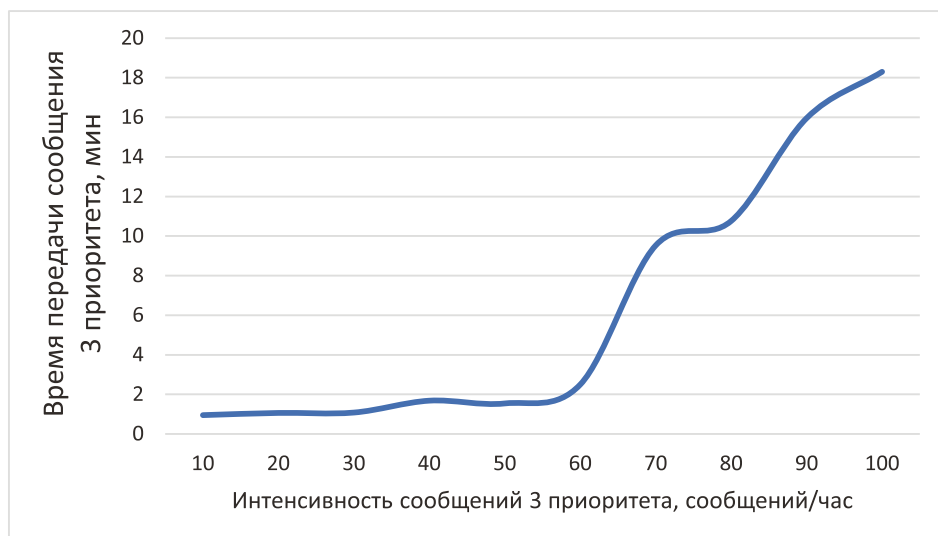


Рис. 9. Зависимость времени доставки сообщений 3 приоритета от интенсивности

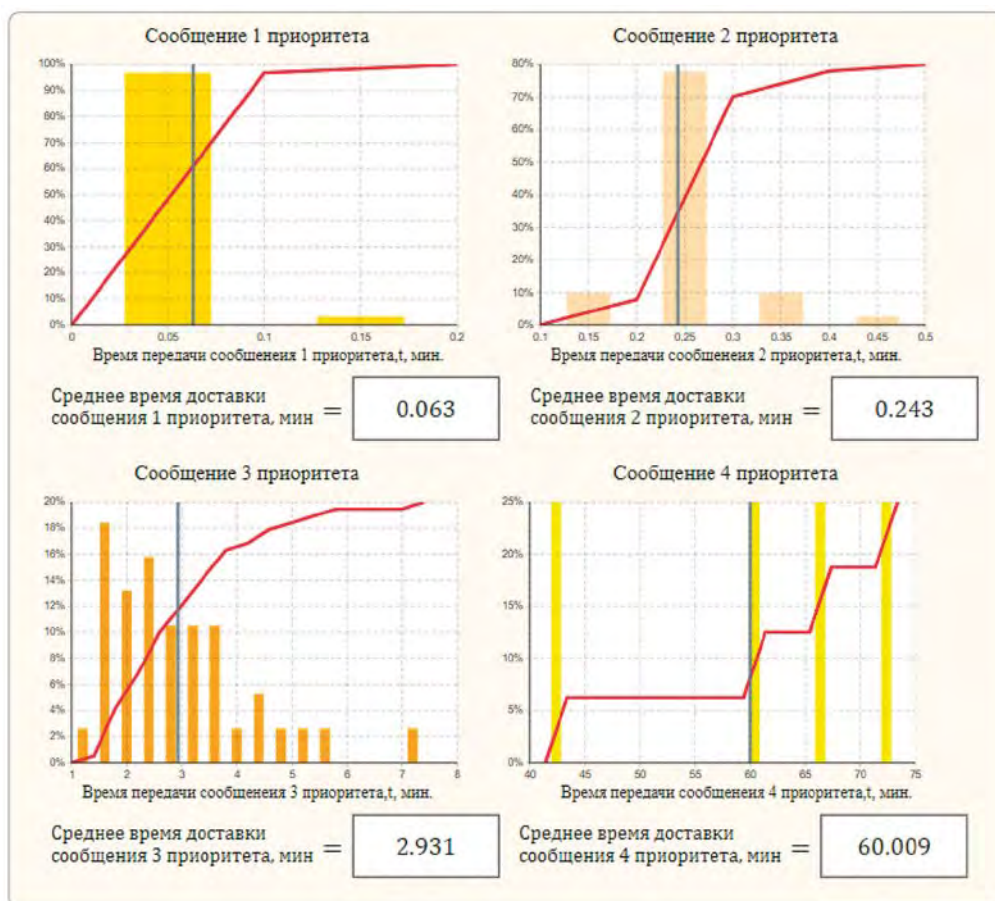
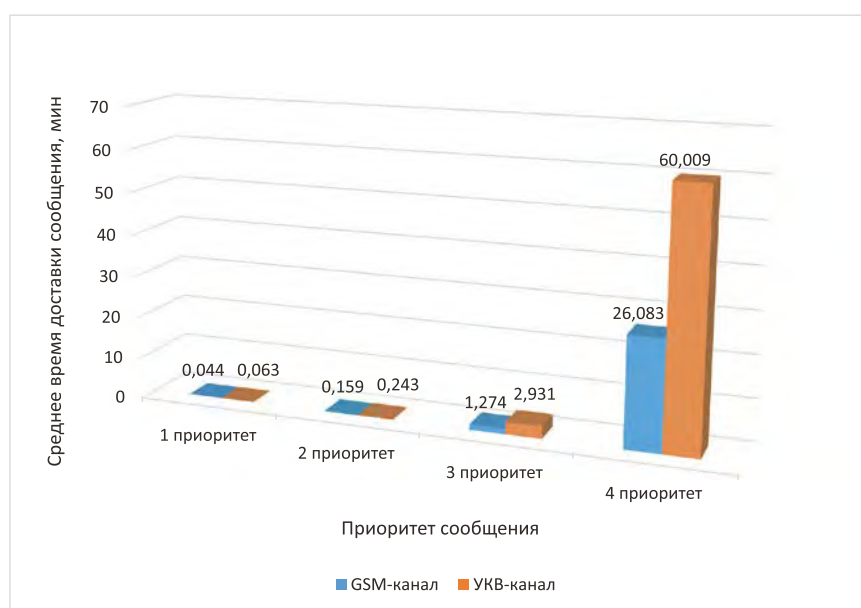


Рис. 10. Результаты моделирования при использовании УКВ-канала и различных интенсивностях сообщений разных приоритетов



**Рис. 11.** Гистограмма среднего времени передачи сообщений при использовании GSM- и УКВ-каналов

### Выводы по результатам моделирования

По результатам моделирования, приведенным выше, можно увидеть, что при одинаковых интенсивностях сообщений всех приоритетов (10 сообщений/час) время передачи сообщений растет с понижением важности. Среднее время передачи сообщения 1 приоритета составляет 0,042 мин, 2 приоритета — 0,14 мин, 3 приоритета — 0,951 мин, 4 приоритета — 3,205 мин (рис. 8). Таким образом, сообщения высшего приоритета будут доставлены в кратчайшие сроки в отличие от сообщений низших приоритетов.

Время передачи сообщений напрямую зависит от интенсивностей данных сообщений, что отчетливо демонстрируют эксперименты, выполненные при различных значениях интенсивности сообщений 3 приоритета. График зависимости на рис. 9 показывает, что при изменении интенсивности от 10 до 500 сообщений/час канал связи справляется с полезной нагрузкой и время передачи сообщений возрастает не критично. При значени-

ях интенсивности 60 сообщений/час и выше можно отметить повышенную занятость каналов связи, увеличенное время доставки сообщений и сообщений, подтверждающих доставку, 3 и 4 приоритета.

Наиболее оптимальным вариантом канала передачи данных является GSM, поскольку он обладает рядом преимуществ, описанных ранее, время передачи сообщений равно: 1 приоритет — 0,044 мин, 2 приоритет — 0,159 мин, 3 приоритет — 1,274 мин, 4 приоритет — 26,083 мин. По результатам видно, что время передачи сообщений 4 приоритета существенно. Чтобы это изменить, необходимо подбирать значения интенсивностей и размеры сообщений непосредственно для каждой системы. Существуют недостатки данной технологии, в том числе: непокрытие сетью удаленных от города мест, а также плохое качество связи в подземных тоннелях.

В случае отсутствия возможности связи через GSM целесообразно при больших

расстояниях применять канал связи УКВ. При моделировании получены следующие временные характеристики: 1 приоритет — 0,063 мин, 2 приоритет — 0,243 мин, 3 приоритет — 2,931 мин, 4 приоритет — 60,009 мин. Диапазон УКВ позволяет осуществлять радиовещание с очень хорошим качеством благодаря использованию частотной модуляции, а расстояние, на котором возможен обмен данными, достигает 100 км.

При необходимости сократить время доставки сообщений 3 и 4 приоритета пользователи могут использовать несколько модемов (приемо-передающих устройств), которые будут отдельно обеспечивать доставку сообщений различного приоритета.

### Заключение

Разработанная имитационная модель дает возможность получить временные характеристики передачи информации при использовании различных каналов связи, позволяя наиболее эффективно подобрать интенсивность и размер различных сообщений, передаваемых между ВАТС/ПАТС в различных условиях, характеристики приемопередающих устройств и их количество и обеспечить оптимальное использование каналов связи в различных условиях.

### Библиографический список

1. Минтранс России разработал отраслевую Стратегию цифровой трансформации [Электронный ресурс]. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9985> (дата обращения: 30.01.2023).

2. Takács Á., Rudas I., Bösl D., et al. Highly Automated Vehicles and Self-Driving Cars [Industry Tutorial] // IEEE Robotics & Automation Magazine. Dec. 2018. Vol. 25, no. 4. P. 106–112. DOI: 10.1109/MRA.2018.2874301.

3. Вчера и завтра: 6 уровней автоматизации автомобилей [Электронный ресурс]. URL: <https://novate.ru/blogs/110617/41716/> (дата обращения: 25.03.2023).

4. ГОСТ Р 70249–2022. Системы искусственного интеллекта на автомобильном транспорте. Высокотоматизированные транспортные средства. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 16 с.

5. Распоряжение Правительства РФ от 25.03.2020 № 724-р «О Концепции обеспечения безопасности дорожного движения с участием беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования» [Электронный ресурс]. URL: [\(https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73707148/#:~:text=%22полностью%20автоматизированное%20транспортное%20средство%22%20-,%20дорожного%20движения%20\(fully%20automated%20vehicle\)](https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73707148/#:~:text=%22полностью%20автоматизированное%20транспортное%20средство%22%20-,%20дорожного%20движения%20(fully%20automated%20vehicle)) (дата обращения: 30.01.2023).

6. Малинецкий Г. Г., Семенов В. В. Дорожное движение в контексте фундаментальных исследований. Препринт. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ РАН) № 64. М., 2007.

7. Комаров В. В. Понятийный аппарат для описания систем автоматизированного вождения автотранспортных средств / В. В. Комаров, С. А. Гараган // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2019. № 3 (82). С. 26–33.

8. Куликова Я. Сценарии управления беспилотными транспортными средствами в среде «Умного города» / Я. Куликова, Д. Качалов, М. П. О. Фархадов // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2020): Материалы XIX Международной конференции имени А. Ф. Терпугова (2–5 декабря 2020 г.). Томск: Изд-во НТЛ, 2021. С. 308–313.

9. Даденков С. А. Выбор среды имитационного моделирования информационно-управляющих сетей / С. А. Даденков, Е. Л. Кон // Вестник Пермского университета. 2019. № 1 (44). С. 58–69.

10. Куприяшкин А. Г. Основы моделирования систем: учеб. пособие. Норильск: Норильский индустр. ин-т, 2015. 135 с.

Дата поступления: 28.11.2023

Решение о публикации: 15.01.2024

**Контактная информация:**

АНДРЕЕВА Арина Руслановна — аспирант, инженер; arinrus9@gmail.com

СОРОКИН Роман Павлович — ведущий специалист; 123roman456@mail.ru

САХАРОВА Мария Александровна — канд. техн. наук, доцент; zvakamariya@mail.ru

ЗАХАРОВ Иван Вячеславович — аспирант, ведущий программист; zakharov.ing@gmail.com

## The model of information and telecommunication interaction between automated vehicles in conditions of incomplete coverage by mobile networks

A. R. Andreeva<sup>1,2</sup>, R. P. Sorokin<sup>2</sup>, M. A. Saharova<sup>1,2</sup>, I. V. Zaharov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

<sup>2</sup> Joint Stock Company “Institute of Telecommunications”, 5, build. 5, litera M, Saint Petersburg, 194100, Russia

**For citation:** *Andreeva A. R., Sorokin R. P., Saharova M. A., Zaharov I. V.* The model of information and telecommunication interaction between automated vehicles in conditions of incomplete coverage by mobile networks // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 290–304. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-290-304

### Abstract

**Objective:** in order to improve safety, as well as optimize the path of movement in everyday life to reduce the time on the road, there are now more and more prerequisites for the introduction of highly automated and fully automated vehicles into various spheres of human life. This will optimize and improve the road system of the country as a whole, and most importantly — reduce accidents and, consequently, improve road safety. When implementing these vehicles, it is necessary to develop an algorithm for communication between different road users under different conditions and distances between objects. **Methods:** this study uses simulation modeling methods, the method of tabular and graphical data display, the method of factor analysis, methods of model experiment, as well as the method of expert assessments. **Results:** within the framework of the work, an algorithm has been developed for transmitting messages with different content and priority information between two highly automated / fully automated vehicles or a vehicle with an automated state infrastructure using various communication channels, as well as a simulation model based on it, which was created in the AnyLogic modeling environment. The use of different priorities allows you to guarantee the minimum delivery time of the most important messages containing information for vehicle management. As a result of the simulation, histograms of the probabilistic-temporal characteristics of the transmission of messages of various priorities and messages confirming their delivery were obtained using various communication channels. **Practical significance:** the simulation results make it possible to assess the quality and time of message delivery under specified conditions and to ensure effective transmission of information by changing the intensity and size of messages, the use of various communication channels and their speeds, and so on.

**Keywords:** automation, vehicle, simulation modeling, communication channel, digitalization, automated vehicle, communication network.

## References

1. Mintrans Rossii razrabotal otraslevuju Strategiju cifrovoj transformacii [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/9985> (data obrashhenija: 30.01.2023). (In Russian)
2. Takács Á., Rudas I., Bösl D., et al. Highly Automated Vehicles and Self-Driving Cars [Industry Tutorial] // IEEE Robotics & Automation Magazine. Dec. 2018. Vol. 25, no. 4. P. 106–112. DOI: 10.1109/MRA.2018.2874301.
3. Vchera i zavtra : 6 urovnej avtomatizacii avtomobilej [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://novate.ru/blogs/110617/41716/\(data obrashhenija: 25.03.2023\)](https://novate.ru/blogs/110617/41716/(data obrashhenija: 25.03.2023)). (In Russian)
4. GOST R 70249–2022. Sistemy iskusstvennogo intellekta na avtomobil'nom transporte. Vysokoavtomatizirovannye transportnye sredstva. Terminy i opredelenija. M.: Rossijskij institut standartizacii, 2022. 16 s. (In Russian)
5. Rasporyzhenie Pravitel'stva RF ot 25.03.2020 № 724-r “O Konceptcii obespechenija bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija s uchastiem bespilotnyh transportnyh sredstv na avtomobil'nyh dorogah obshhego pol'zovanija” [Jelektronnyj resurs]. URL: [\(data obrashhenija: 30.01.2023\)](https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73707148/#:~:text=%22polnost'ju%20avtomatizirovannoe%20transportnoe%20sredstvo%22%2-,dorozhnogo%20dvizhenija%20(fully%20automated%20vehicle)). (In Russian)
6. Malineckij G. G., Semenov V. V. Dorozhnoe dvizhenie v kontekste fundamental'nyh issledovanij. Preprint. Institut prikladnoj matematiki im. M. V. Keldysha (IPM RAN) № 64. M., 2007. (In Russian)
7. Komarov V. V. Ponjatijnyj apparat dlja opisanija sistem avtomatizirovannogo vozhdenija avtotransportnyh sredstv / V. V. Komarov, S. A. Garagan // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, jekonomike. 2019. № 3 (82). S. 26–33. (In Russian)
8. Kulikova Ja. Scenarii upravlenija bespilotnymi transportnymi sredstvami v srede “Umnogo goroda” / Ja. Kulikova, D. Kachalov, M. P. O. Farhadov // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie (ITMM-2020): Materialy XIX Mezhdunarodnoj konferencii imeni A. F. Terpugova (2–5 dekabrja 2020 g.). Tomsk: Izd-vo NTL, 2021. S. 308–313. (In Russian)
9. Dadenkov S. A. Vybor sredy imitacionnogo modelirovanija informacionno-upravljajushhijh setej / S. A. Dadenkov, E. L. Kon // Vestnik Permskogo universiteta. 2019. № 1 (44). S. 58–69. (In Russian)
10. Kuprijashkin A. G. Osnovy modelirovanija sistem: ucheb. posobie. Noril'sk: Noril'skij industr. in-t, 2015. 135 s. (In Russian)

Received: 28.11.2023

Accepted: 15.01.2024

### Author's information:

Arina R. ANDREEVA — Postgraduate Student, engineer; arinrus9@gmail.com

Roman P. SOROKIN — Leading Specialist; 123roman456@mail.ru

Maria A. SAHAROVA — PhD in Engineering, Associate Professor; zuvakamariya@mail.ru

Ivan V. ZAHAROV — Postgraduate Student, Leading Programmer; zakharov.ing@gmail.com