

## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ, том 20, выпуск 1, 2023

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

### Учредитель

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

### Издатель

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

### Адрес учредителя

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

### Адрес издателя

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

### Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

### Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

**Журнал включен в перечень** ведущих  
рецензируемых научных журналов и изданий  
(решение Президиума Высшей аттестационной  
комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015, № 6/6)

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

**Журнал имеет** институт рецензирования

### Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33315

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

**Канаев Андрей Константинович**, заместитель главного  
редактора, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-  
Петербург, Россия

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

## РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Чжан Чжунъян**, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный  
профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай

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

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

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

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

**Подписано в печать** с оригинал-макета 16.03.2023.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 32,75.  
Тираж 300 экз. Заказ. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023

## SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,  
volume 20, issue 1, 2023

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

### Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

### Publisher

Limited Liability Company  
"Publishing Center RIOR" under contract  
N ЭА94514 dated December 19, 2022

### Founder's address

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

### Publisher's address

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

### Mass media registration certificate number

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

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

**Andrey Kanayev**, Deputy Editor-in-chief, D. Eng. Sci.,  
Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport  
University, St. Petersburg, Russia

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

## EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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

**Zhang Zhongyang**, University Degree, Professor,  
Zhengzhou Railway Vocational & Technical College,  
Professor, Secretary of the School of Locomotives and Rolling  
Stock, Zhengzhou, China

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### → ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

**Кравцов С. А., Болдырев А. П., Лозбинев Ф. Ю.**

Расчетно-экспериментальная оценка характеристик полимерных элементов ..... 7

**Бушуев Н. С., Шульман Д. О., Рочев Н. А.**

Результаты освоения пассажирских перевозок на направлении  
Москва – Санкт-Петербург в кризисные 2020–2021 годы..... 17

**Марченко М. А.**

Математическая модель и способ расчета пропускной способности ..... 28

**Поярков М. Г., Самошкин О. С., Смирнов А. А.**

Анализ состояния и перспективы развития пассажирского железнодорожного  
транспорта для перевозки маломобильных групп населения ..... 38

**Кручек В. А., Дворкин П. В.**

Моделирование процессов тепловой диагностики тепловозной выпрямительной установки .... 52

**Даниленко Д. В., Ефимов В. П., Чернов В. А.**

Исследование циклической трещиностойкости стали литых несущих  
деталей грузовых вагонов..... 60

### → ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

**Ермаков С. Г., Куценко С. М., Гильванов Р. Г.**

Актуальные вопросы организации деятельности цифровой кафедры  
в условиях цифровой трансформации вуза ..... 70

**Капинос О. Г., Твардовская Н. В.**

Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке ..... 79

**Постнова Е. В., Рунев Е. В.**

Факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов ..... 91

**Бодунов Е. Н., Семенов А. О.**

Распределение плотности в газовой оболочке планеты..... 101

**Макарова Е. И., Криушина А. О.**

Разработка новых геозащитных материалов с улучшенными эксплуатационными  
свойствами для повышения техносферной безопасности ..... 110

**Давыдова Д., Гильванов Г. Р., Кукушкина Я. В., Романова И. Ю.**

Иммерсивные технологии в высшем образовании ..... 120

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Чистяков Э. Ю., Павлов А. Ю., Гренадер Я. А., Нуриев А. Г.</b>                                              |     |
| Дистанционная калибровка шаблонов в районах Крайнего Севера .....                                              | 133 |
| <b>Верех-Белоусова Е. И., Харламова А. В.</b>                                                                  |     |
| Экологически безопасные направления использования<br>отходов добычи угля как техногенного сырья алюминия ..... | 142 |
| <b>Канаев А. К., Логин Э. В., Пудовкина К. А.</b>                                                              |     |
| Декомпозиция процессов управления данными в CMDb.....                                                          | 151 |

## → СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Веселов В. В.</b>                                                                                                              |     |
| Безопасная эксплуатация зданий и сооружений на транспорте .....                                                                   | 161 |
| <b>Ульяницкая В. И., Иванова Е. М., Исакова Д. Ю., Кишикова А. М.</b>                                                             |     |
| Создание автоматизированной программы по расчету значений целевых показателей<br>для выполнения графика движения.....             | 172 |
| <b>Бадецкий А. П., Медведь О. А.</b>                                                                                              |     |
| Онтологический подход к разработке единой базы знаний мультимодальных перевозок .....                                             | 182 |
| <b>Марченко М. А.</b>                                                                                                             |     |
| Совершенствование аналитического метода расчета наличной пропускной способности<br>с применением имитационного моделирования..... | 194 |
| <b>Борисов П. В., Воробьев А. А., Константинов К. В., Самаркина И. К.</b>                                                         |     |
| Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи .....                                                              | 207 |
| <b>Клюшина А. В., Кипина А. А., Туманов И. Д., Терёхин И. А., Баранов И. А.</b>                                                   |     |
| Электрификация валдайского сельского поселения за счет применения альтернативных<br>возобновляемых источников энергии.....        | 222 |
| <b>Богданович Д. Е., Богданович С. В.</b>                                                                                         |     |
| Оценка влияния внутренних факторов на потребное число приемоотправочных путей<br>технических станций.....                         | 231 |
| <b>Пегин П. А., Немчинов Д. М., Ильин А. А.</b>                                                                                   |     |
| Концептуальные основы методологии проектирования автодорожной<br>транспортной системы .....                                       | 239 |
| <b>Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г., Самаркина И. К.</b>                                                          |     |
| Перспективы применения автономного шинного трамвая Phileas<br>с технологией магнито-электронного наведения.....                   | 252 |

## CONTENTS

### → PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

**Kravtsov S. A., Boldyrev A. P., Lozbinev F. Yu.**

Computational and Experimental Evaluation of the Characteristics of Polymer Elements .....15

**Bushuev N. S., Shulman D. O., Rochev N. A.**

Mastering Results for Passenger Transportation on Moscow – St. Petersburg

Direction in Crisis 2020-2021 .....26

**Marchenko M. A.**

Mathematical Model and Approach to Calculate Throughput .....35

**Poyarkov M. G., Samoshkin O. S., Smirnov A. A.**

Analysis of the State and Horizon Development of Railway Passenger Transport

for Population Groups with Reduced Mobility .....50

**Kruchek V. A., Dvorkin P. V.**

Modeling the Processes of Thermal Diagnostics of Diesel Locomotive Rectifier .....58

**Danilenko D. V., Efimov V. P., Chernov V. A.**

Exploration of Cyclic Crack Resistance of Steel of Molten Load-Bearing Parts for Freight Cars .....67

### → GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

**Ermakov S. G., Kutsenko S. M., Gilvanov R. G.**

Topical Issues of Organizing Digital Department Activities

in the Context of University Digital Transformation .....76

**Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V.**

Hydraulic Hits in Penstocks with Above-Ground Laying in Permafrost Conditions.....88

**Postnova E. V., Runev E. V.**

Factor Model of Vibrodynamic Load Effect on Pipeline Reliability .....99

**Bodunov E. N., Semenov A. O.**

Density Distribution in the Gaseous Envelope of the Planet ..... 108

**Makarova E. I., Kriushina A. O.**

Development of New Geo-Protective Materials with Improved Exploitation Properties

for Technosphere Safety Rise ..... 117

**Davydova D., Gilvanov G. R., Kukushkina Ya. V., Romanova I. Yu.**

Immersive Technologies in Higher Education ..... 129

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Chistyakov E. Yu., Pavlov A. Yu., Grenader Ya. A., Nuriev A. G.</b>                                                    |     |
| Remote Calibration of Templates in the Far North districts .....                                                          | 140 |
| <b>Verekh-Belousova E. I., Kharlamova A. V.</b>                                                                           |     |
| Environmentally Safe Trends of Coal Mining Waste Usage<br>as Aluminum Technogenic Raw Material .....                      | 149 |
| <b>Kanaev A. K., Login E. V., Pudovkina K. A.</b>                                                                         |     |
| Decomposition of Data Management Processes in Configuration<br>Management DataBase (CMDB).....                            | 159 |
| <b>→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT</b>                                                                                  |     |
| <b>Veselov V. V.</b>                                                                                                      |     |
| Safe Operation of Buildings and Constructions on Transport .....                                                          | 169 |
| <b>Ulyanitskaya V. I., Ivanova E. M., Isakova D. Yu., Kishikova A. M.</b>                                                 |     |
| Creation of Automated Program for Calculating the Values<br>of Target Indicators for Traffic Schedule Implementation..... | 179 |
| <b>Badetskii A. P., Medved O. A.</b>                                                                                      |     |
| Ontological Approach to the Development of Unified Knowledge Base<br>of Multimodal Transportations .....                  | 191 |
| <b>Marchenko M. A.</b>                                                                                                    |     |
| Improvement of Analytical Method for Calculating<br>Actual Throughput with Simulation Modeling Application .....          | 203 |
| <b>Borisov P. V., Vorobyev A. A., Konstantinov K. V., Samarkina I. K.</b>                                                 |     |
| Research of Lithium-Ion Battery Characteristics.....                                                                      | 220 |
| <b>Klyshina A. V., Kipina A. A., Tumanov I. D., Terekhin I. A., Baranov I. A.</b>                                         |     |
| Electrification of Valdai Village Through the Use of Alternative Renewable Energy Sources .....                           | 229 |
| <b>Bogdanovich D. E., Bogdanovich S. V.</b>                                                                               |     |
| Assessment of Internal Factors Influence on the Required<br>Number of Receiving Ways at Technical Stations .....          | 237 |
| <b>Pegin P. A., Nemchinov D. M., Ilyin A. A.</b>                                                                          |     |
| Conceptual Foundations of Projection Methodology for Road Transport System .....                                          | 249 |
| <b>Vorobiev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G., Samarkina I. K.</b>                                                 |     |
| Horizon to Use Autonomous Tire Tram Phileas with Magnetic-Electronic Steering Technology .....                            | 261 |



УДК 629.4.028.86

## Расчетно-экспериментальная оценка характеристик полимерных элементов

С. А. Кравцов, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинев

Брянский государственный технический университет, Российская Федерация, 241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

**Для цитирования:** Кравцов С. А., Болдырев А. П., Лозбинев Ф. Ю. Расчетно-экспериментальная оценка характеристик полимерных элементов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 7–16. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-7-16

### Аннотация

**Цель:** Изучить работу полимерных элементов поглощающего аппарата автосцепного устройства. Разработать модели полимерных элементов подпорного комплекта поглощающего аппарата с учетом применения в полимерном элементе частей, теряющих устойчивость в процессе работы. Получить силовые характеристики разработанных моделей полимерных элементов с помощью компьютерного моделирования. Сравнить параметры полученных силовых характеристик с экспериментальными данными немодернизированного полимерного элемента. В качестве объекта исследований использовать опорный полимерный элемент поглощающего аппарата ПМКП-110. **Методы:** Для определения оптимального варианта геометрии полимерного элемента использовалось компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов (МКЭ). Поскольку работа полимерных элементов предполагает значительные деформации самих элементов, то моделирование проводилось в программном пакете, специализирующемся на решении высоконелинейных задач. Для сравнения эффективности разработанных моделей было проведено экспериментальное исследование полимерного элемента. **Результаты:** Показана необходимость исследования и модернизации полимерных комплектов поглощающих аппаратов автосцепного устройства. Рассмотрено одно из направлений модернизации полимерных элементов, и представлено несколько вариантов моделей полимерных элементов, спроектированных в рамках исследуемого направления. Из возможных моделей выбран наиболее перспективный вариант. Даны рекомендации для дальнейших исследований. **Практическая значимость:** Рассмотренный подход в изучении и модернизации полимерных элементов позволяет получить полимерный комплект с улучшенными параметрами силовой характеристики — энергоемкостью и коэффициентами полноты. Подобные полимерные комплекты, установленные в поглощающие аппараты, могут повысить их надежность, увеличить эффективность, что в целом может сказаться на сохранности вагонов и перевозимых ими грузов.

**Ключевые слова:** Полимерный элемент, поглощающий аппарат автосцепного устройства, метод конечных элементов, силовая характеристика, коэффициент полноты, энергоемкость, гиперупругий материал.



В настоящее время железнодорожный транспорт является одним из самых значимых и востребованных для экономики Российской Федерации, его доля в общем грузообороте страны, по данным Федеральной службы государственной статистики, постоянно увеличивается [1] (рис. 1).

За январь — май 2022 года он был равен 1 110 292 млн тонно-км, что составило 46,86 % от общего объема грузооборота в стране.

При таких объемах перевозок обеспечение сохранности перевозимого груза всегда будет актуально, а также являться одним из важнейших направлений в исследовании и модернизации подвижного состава железных дорог. Особую актуальность оно получает ввиду возможного увеличения вероятности соударения с повышенными скоростями из-за роста числа механизированных горок и вагонов на роликовых подшипниках [2]. Кроме того, не стоит забывать, что нарушение сохранности груза может повлечь за собой не только материальный ущерб, но и обернуться экологической катастрофой или человеческими жертвами.

Из всех возможных эксплуатационных нагрузок, действующих на вагон, наиболее опасными являются продольные нагрузки, возникающие во время экстренных режимов движения или при соударении вагонов на сортировочных станциях. Для снижения продольных нагрузок, а также для поглощения энергии соударения в конструкции автосцепного устройства вагона предусмотрено использование межвагонного амортизатора удара — поглощающего аппарата [3]. Для нормальной работы в реальных условиях эксплуатации поглощающие аппараты как основной элемент снижения продольной нагруженности вагонов должны обладать достаточными надежностью и прочностью, большей энергоемкостью, необходимой поглощающей способностью и оптимальной формой силовой характеристики [4].

По эксплуатационным техническим показателям поглощающие аппараты разделяются на классы в соответствии с ГОСТ 32913. Наиболее распространенными являются поглощающие аппараты класса Т1, предназначенные для ваго-

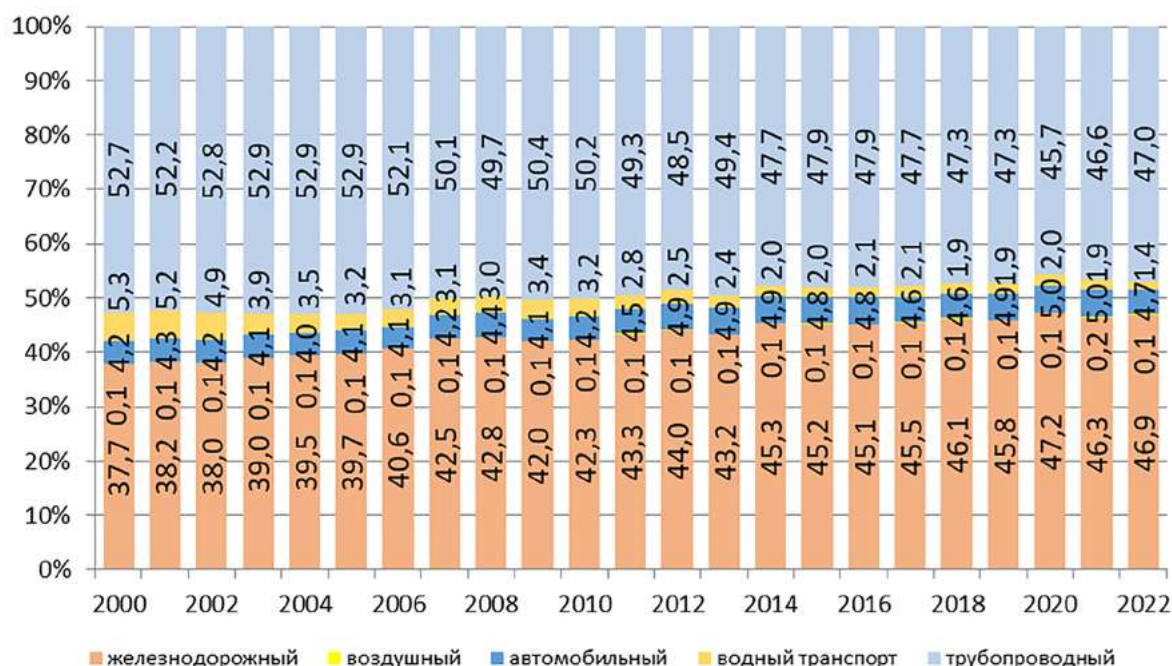


Рис. 1. Структура грузооборота по видам транспорта по Российской Федерации





Рис. 2. Модели фрикционно-полимерных поглощающих аппаратов:  
*а* — поглощающий аппарат ПМКП-110; *б* — поглощающий аппарат РТ-120

нов, перевозящих все виды грузов (кроме опасных грузов), а также маневровых локомотивов массой до 100 т включительно [5, 6]. Большинство моделей этого класса по принципу действия относятся к фрикционно-полимерным аппаратам, где в качестве основного компонента, поглощающего энергию, используется фрикционный узел, а блок полимерных элементов играет роль подпорно-возвратного устройства, удерживающего фрикционный узел в рабочем положении и возвращающего его в исходное состояние после нагрузки [7]. Примеры моделей фрикционно-полимерных поглощающих аппаратов представлены на рис. 2.

Роль полимерного комплекта в поглощающих аппаратах, несомненно, велика. Помимо указанных функций, он также поглощает часть введенной энергии, а его конструкция из последовательно установленных полимерных элементов за счет снижения начальной затяжки позволяет продолжить работу поглощающего аппарата в случае поломки одного из этих элементов, что повышает сохранность подвижного состава и перевозимых грузов в аварийных ситуациях. Таким образом, улучшение характеристик полимерного ком-

плекта может существенно сказаться на характеристиках поглощающего аппарата в целом и, как следствие, на сохранности подвижного состава и перевозимых грузов [8, 9].

Но проектирование новых полимерных элементов имеет свои проблемы. Из-за дороговизны материала, существенного времени изготовления, технологических трудностей при производстве проведение широких экспериментальных исследований может потребовать существенных ресурсов. Самым простым выходом из этой ситуации является использование компьютерного моделирования, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). При расчете подобных объектов надо понимать, что придется иметь дело с расчетом высоконелинейной задачи, и выбор программного пакета для реализации подобных решений должен это учитывать [10].

Для расчетов конструкций, содержащих элементы из гиперупругих материалов, какими полимеры и являются, крайне важно знать свойства этих материалов, полученные экспериментальным путем. По результатам эксперимента опытных образцов получают математическую модель материала. В дальнейшем эту модель применяют

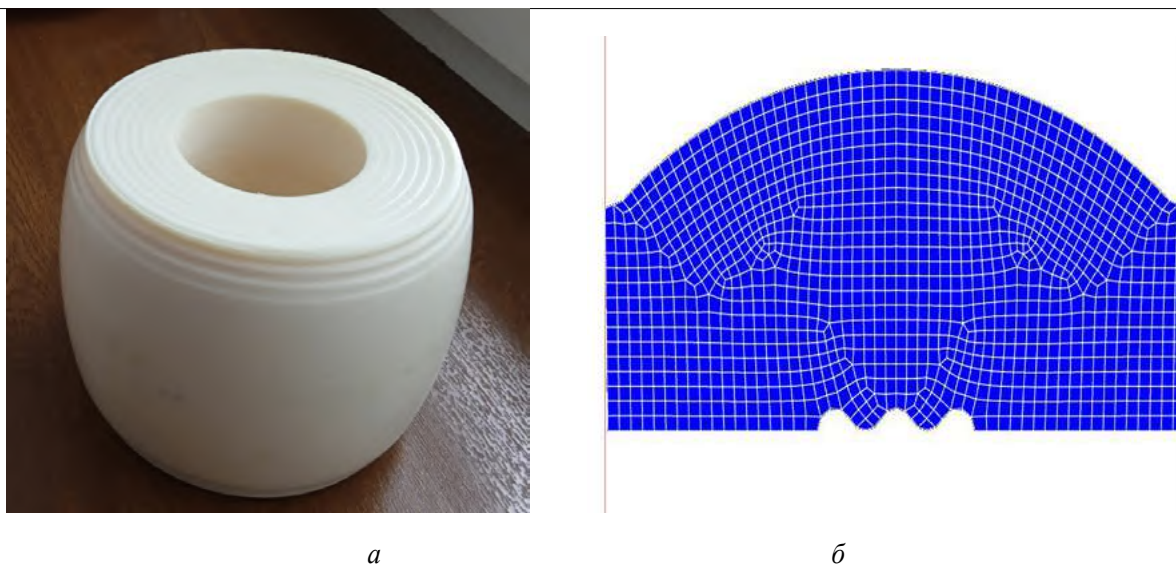


Рис. 3. Опорный полимерный элемент поглощающего аппарата ПМКП-110:

*a* — фотография опорного элемента;

*б* — конечно-элементная модель в осесимметричной постановке

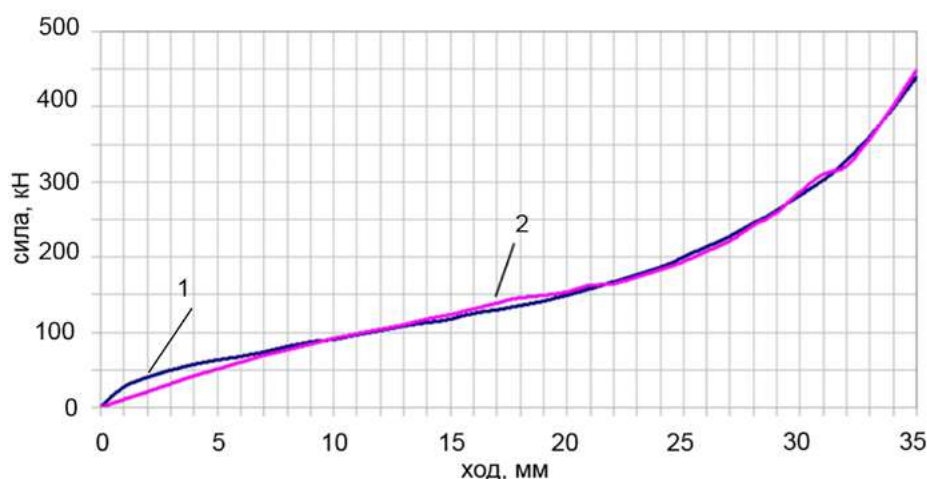


Рис. 4. Экспериментальная (график 1) и расчетная (график 2) силовые характеристики опорного элемента поглощающего аппарата ПМКП-110

к реальному объекту и сверяют с экспериментальными данными уже самого объекта, проверяя тем самым ее адекватность. В нашем случае объектом, на котором проверялась адекватность созданной математической модели материала, выступил полимерный элемент поглощающего аппарата ПМКП-110 (рис. 3).

Силовые характеристики экспериментального образца и конечно-элементной модели полимерного элемента показаны на рис. 4.

Силовые характеристики реального и смоделированного полимерного элемента практически совпали: погрешность составила 3,2 % по полноте, 1,2 % по энергоемкости.

Следующим шагом был непосредственно поиск более эффективной геометрии полимерного элемента, где в качестве критерия эффективности было выбрано значение энергоемкости и полноты силовой характеристики при максимальном значении сжимающей силы около 400 кН —

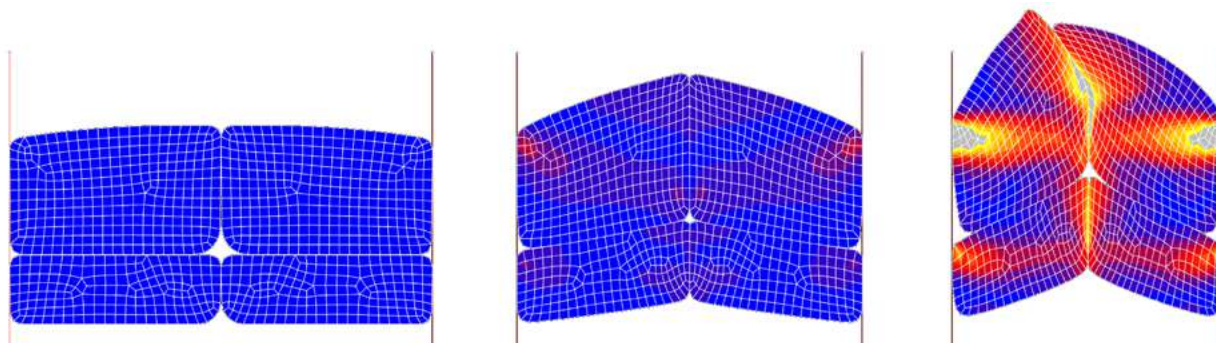


Рис. 5. Деформация элемента из четырех составных цилиндров

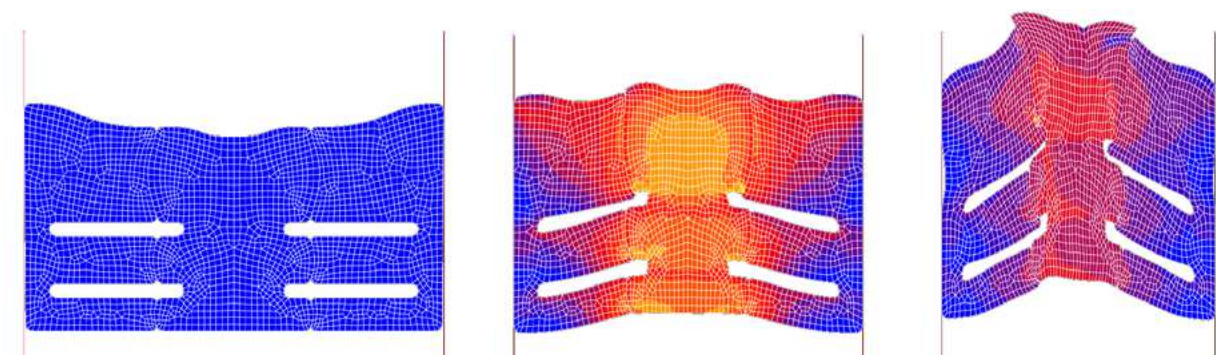


Рис. 6. Деформация трехсоставного полимерного элемента

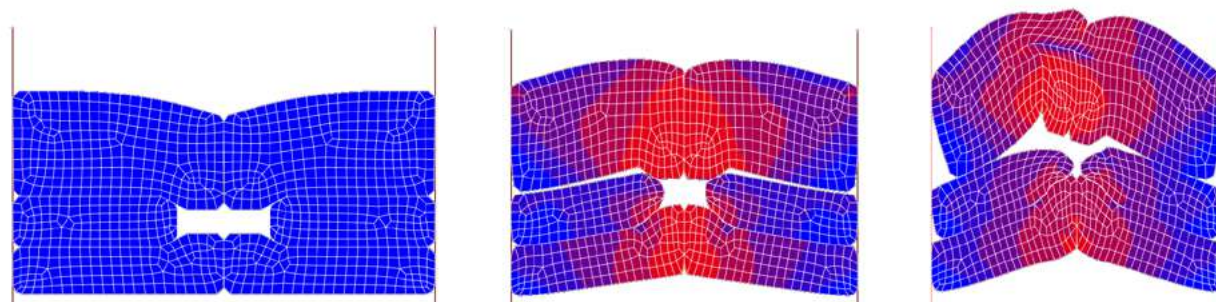


Рис. 7. Деформация элемента с выходящими из зацепления средними кольцами

чем выше энергоемкость и полнота характеристики, тем лучшей она считается.

Хорошие результаты показала идея уменьшения силы сопротивления сжатию вследствие потери устойчивости частей элемента. Примеры расчета элементов, реализующих данную идею, приведены на рис. 5–7.

Для увеличения полноты силовой характеристики был проведен ряд расчетов, где параметры силовой характеристики улучшались за счет при-

менения «пар устойчивости» — конструктивных частей элемента, находящихся во взаимном распоре и способных к прогнозируемой потере устойчивости. При малых перемещениях они, благодаря своему количеству, создают достаточную силу реакции на сжатие, при последующей же потере устойчивости «смягчают» силовую характеристику. Пример подобной конструкции приведен на рис. 8, где в одном элементе реализовано три «пары устойчивости».



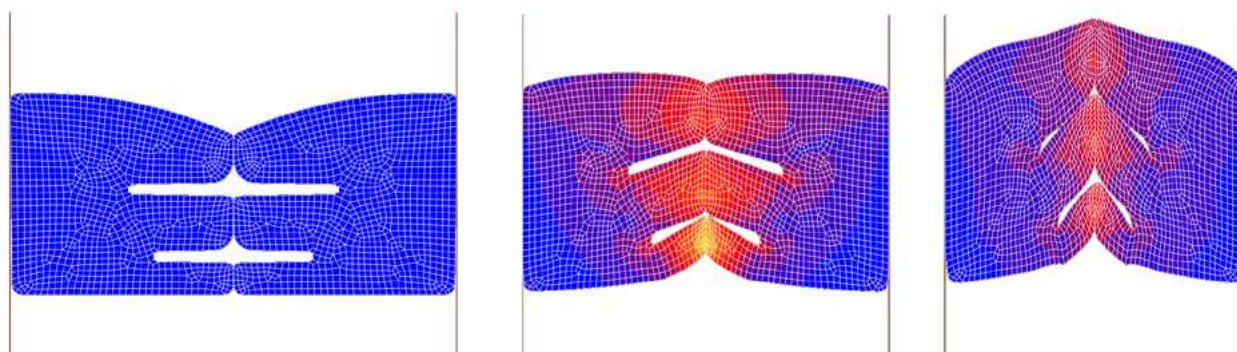


Рис. 8. Деформация элемента с тремя парами устойчивости

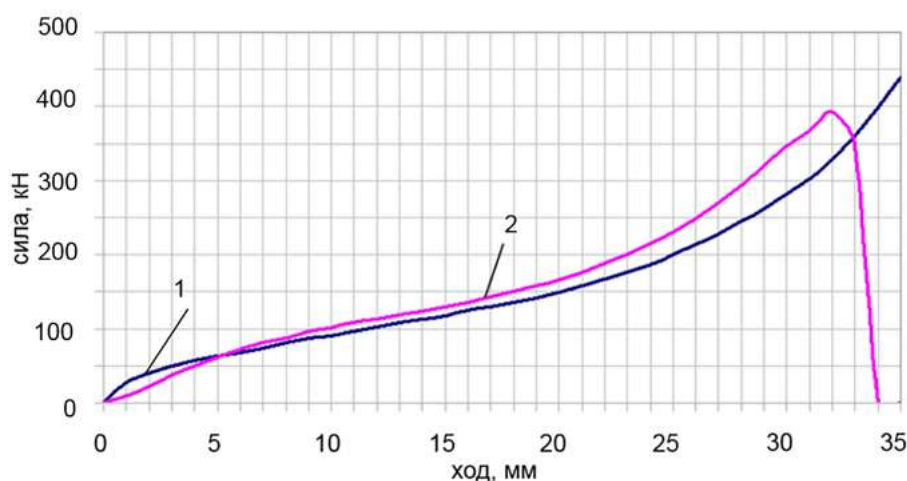


Рис. 9. Силовые характеристики элементов:  
график 1 — экспериментальная, опорного элемента аппарата ПМКП-110;  
график 2 — расчетная, элемента с тремя парами устойчивости

Расчет показал, что элемент «разрушается» в основании ближней к оси симметрии пары устойчивости, достигнув величины хода лишь 33 мм из 35 возможных (рис. 9).

Тем не менее внешняя часть элемента претерпела наименьшее искажение формы в нагруженном состоянии, а увеличение внешнего диаметра при достаточной силе сопротивления сжатию было наименьшим из всех рассмотренных моделей. По всей видимости, это связано с уменьшением внешнего диаметра составного элемента от крайних плоскостей к средней. Кроме того, проблему с концентрацией напряжений из-за малого расстояния между выступами несложно решить, заменив два

средних выступа вложенной парой устойчивости, выполненной в виде отдельных частей. Пример такого элемента представлен на рис. 10.

Полученный элемент состоит из двух пар концентрических осесимметричных объектов, в каждую из которых входит так называемое большое и малое кольцо. Наибольший внешний диаметр большого кольца составляет 160 мм, высота — 50 мм. Малое кольцо вкладывается в большое, образуя половину составного элемента. При смыкании двух половин большие кольца образуют две пары устойчивости — наружную и внутреннюю, третья вложенная пара устойчивости образуется малыми кольцами.

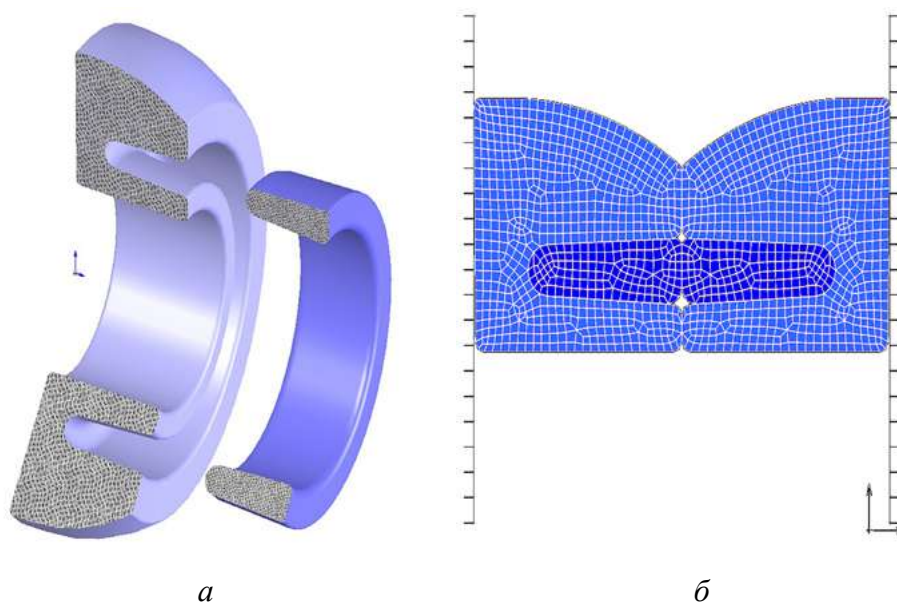


Рис. 10. Модель опорного полимерного элемента с вложенным кольцом:  
*a* — геометрическая модель;  
*б* — конечно-элементная модель в осесимметричной постановке

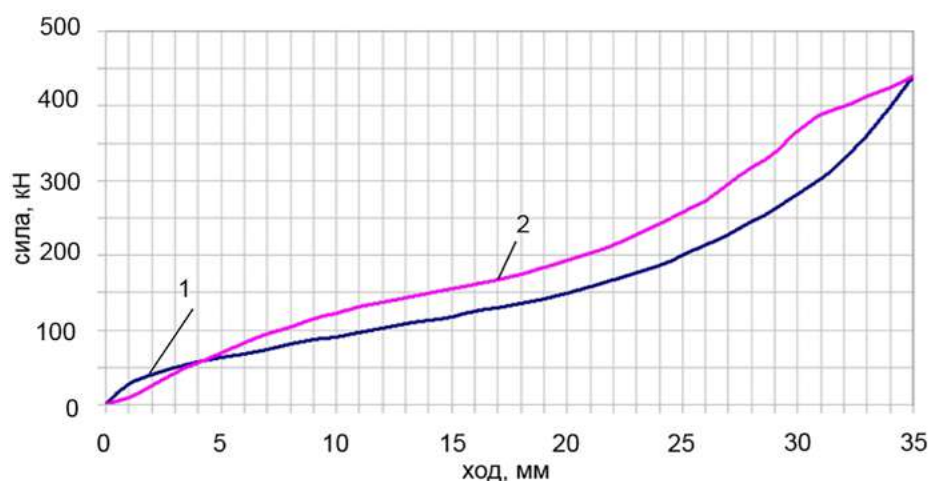


Рис. 11. Силовые характеристики элементов:  
 график 1 — экспериментальная, опорного элемента аппарата ПМКП-110;  
 график 2 — расчетная, элемента с вложенными кольцами

Силовая характеристика элемента с вложенными кольцами представлена на рис. 11, параметры силовой характеристики — в таблице.

Полученные результаты показывают значительное преимущество расчетной силовой характеристики элемента с вложенными кольцами над экспериментальной характеристикой элемента, с которым производится сравнение.

Параметры расчетных силовых характеристик

| Вид силовой характеристики                 | Коэффициент полноты | Энергоемкость, кДж | Макс. сила, кН |
|--------------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| Экспериментальная (элемент ПМКП-110)       | 0,363               | 5,59               | 431,6          |
| Расчетная (элемент со вложенными кольцами) | 0,448               | 6,89               | 430,7          |
| Расхождение                                | 23,6 %              | 23,4 %             | −0,2 %         |

По наиболее значимому параметру — энергоемкости — достигнут прирост в 23,4 %, полнота характеристики увеличилась на 23,6 %, при этом максимальное усилие осталось практически на прежнем уровне, снизившись на 0,2 %.

Разумеется, ни полученная расчетная силовая характеристика, ни положительная оценка принципиальной работоспособности созданного элемента не дают оснований для каких-либо выводов о перспективности выбранного технического решения. Точный ответ на этот вопрос может быть получен только в результате экспериментальных исследований, в ходе которых наверняка претерпят изменение и расчетная модель, и наши представления о характеристиках используемого полимерного материала.

Тем не менее результаты проведенного исследования дают основания полагать целесообразными дальнейшие усилия по разработке и изучению свойств составных полимерных элементов.

### Библиографический список

1. Федеральная служба государственной статистики: Транспорт. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 26.07.2022).
2. Болдырев А. П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава / А. П. Болдырев, П. Д. Жиров. — Курск: Университетская книга, 2021. — 230 с.
3. Кеглин Б. Г. Грузовым вагонам — современные поглощающие аппараты / Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. С. Васильев и др. // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2014. — № 4(40). — С. 20–21.
4. Болдырев А. П. Основные тенденции разработки и внедрения новых конструкций поглощающих аппаратов автосцепки грузовых вагонов / А. П. Болдырев, Д. А. Ступин, А. М. Гуров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15. — № 1. — С. 30–35.

5. ГОСТ 32913—2014. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки. Введ. 01.06.2015. Госстандарт России: ФГУП «Стандартинформ», 2015. — 12 с.

6. Болдырев А. П. Теоретические и экспериментальные исследования полимерных элементов амортизаторов удара автосцепки / А. П. Болдырев, В. В. Говоров // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2011. — № 2(30). — С. 42–46.

7. Болдырев А. П. Разработка и исследование фрикционно-полимерного поглощающего аппарата ПМКП-110 класса Т1 / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин, А. В. Иванов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2005. — № 4. — С. 8.

8. Болдырев А. П. Разработка и внедрение перспективных поглощающих аппаратов автосцепки для грузовых вагонов / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин // Тяжелое машиностроение. — 2005. — № 12. — С. 20–24.

9. Кеглин Б. Г. Улучшение конструкции поглощающих аппаратов / Б. Г. Кеглин, Л. Н. Никольский, А. Г. Стриженко // Железнодорожный транспорт. — 1980. — № 6. — С. 23–26.

10. Жилкин В. А. Моделирование и статический расчет элементов конструкций в MSC PATRAN-NASTRAN-MARC: учебное пособие / В. А. Жилкин. — СПб.: Проспект Науки, 2016. — 240 с. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/80063.html> (дата обращения: 04.08.2022).

Дата поступления: 24.10.2022

Решение о публикации: 06.02.2023

### Контактная информация:

КРАВЦОВ Сергей Андреевич — ассистент;  
[kravtsovs\\_bryansk@mail.ru](mailto:kravtsovs_bryansk@mail.ru)

БОЛДЫРЕВ Алексей Петрович — д-р техн. наук,  
профессор; [apb.tubryansk@gmail.com](mailto:apb.tubryansk@gmail.com)

ЛОЗБИНЕВ Федор Юрьевич — д-р техн. наук,  
профессор; [flozbinev@yandex.ru](mailto:flozbinev@yandex.ru)



## Computational and Experimental Evaluation of the Characteristics of Polymer Elements

S. A. Kravtsov, A. P. Boldyrev, F. Yu. Lozbinev

Bryansk State Technical University, 7, boulevard 50 let Oktyabrya, Bryansk, 241035, Russian Federation

**For citation:** Kravtsov S. A., Boldyrev A. P., Lozbinev F. Yu. Computational and Experimental Evaluation of the Characteristics of Polymer Elements // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 7–16. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-7-16

### Summary

**Purpose:** To study the job of polymer elements of coupler draft gear. To develop the models of polymer elements of draft gear retaining set given the use in a polymer element of parts that lose stability during an operation. To obtain force characteristics of the developed models of polymer elements with the help of computer simulation. To compare the parameters of obtained force characteristics with the experimental data of non-modernized polymer element. As an object of research, to use supporting polymer element of draft gear PMKP-110.

**Methods:** Computer modeling based on finite element method (FEM) was used to determine optimal variant of polymer element geometry. Since polymer elements' job involves significant deformation of the elements themselves, the simulation was carried out in software package, which specializes in solving highly nonlinear problems. To compare the effectiveness of the developed models, the polymer element experimental study was carried out. **Results:** The necessity to study and modernize polymeric suites of automatic coupler draft gears is shown. One of the directions for polymer elements modernization is considered and several variants for polymer element models designed within the studied trends are presented. The most promising variants from possible models was chosen. Further research recommendations are given. **Practical significance:** The considered approach in polymer element study and modernization makes it possible to obtain a polymer suite with force characteristic improved parameters — an energy intensity and completeness coefficients. Such polymer suites installed into draft gears can increase their reliability, increase the efficiency that in a whole can affect the safety of cars and goods they carry.

**Keywords:** Polymer element, automatic coupler draft gear, finite element method, force characteristic, completeness coefficient, energy intensity, hyper-elastic material.

### References

1. *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki: Transport* [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (accessed: July 26, 2022). (In Russian)
2. Boldyrev A. P., Zhirov P. D. *Raschet i proektirovanie amortizatorov udara podvizhnogo sostava* [Calculation and design of rolling stock shock absorbers]. Kursk: Universitetskaya kniga Publ., 2021, 230 p. (In Russian)
3. Keglin B. G., Boldyrev A. P., Vasil'ev A. S. et al. *Gruzovym vagonam — sovremennye pogloshchayushchie apparaty* [Modern draft gears for freight cars]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Wagons and wagon economy]. 2014, Iss. 4(40), pp. 20–21. (In Russian)
4. Boldyrev A. P., Stupin D. A., Gurov A. M. *Osnovnye tendentsii razrabotki i vnedreniya novykh konstruktsiy pogloshchayushchikh apparatov avtostsepi gruzovykh vagonov* [Main trends in the development and implementation of new designs of draft gears for automatic couplers of freight cars]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 30–35. (In Russian)
5. GOST 32913—2014 *Apparaty pogloshchayushchie stsepykh i avtostsepykh ustroystv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie trebovaniya i pravila priemki. Vved. 01.06.2015* [GOST 32913—2014 Apparatus absorbing couplers and automatic couplers of railway rolling stock. Technical requirements and acceptance rules].

Gosstandart Rossii: FGUP “Standartinform”, 2015, 12 p. (In Russian)

6. Boldyrev A. P., Govorov V. V. Teoreticheskie i eksperimental’nye issledovaniya polimernykh elementov amortizatorov udara avtostseпки [Theoretical and experimental studies of polymeric elements of automatic coupler shock absorbers]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2011, Iss. 2(30), pp. 42–46. (In Russian)

7. Boldyrev A. P., Keglin B. G., Ivanov A. V. Razrabotka i issledovanie friktsionno-polimernogo pogloshchayushchego apparata PMKP-110 klassa T1 [Development and research of the friction-polymer draft gear PMKP-110 class T1]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel’skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2005, Iss. 4, pp. 8. (In Russian)

8. Boldyrev A. P., Keglin B. G. Razrabotka i vnedrenie perspektivnykh pogloshchayushchikh apparatov avtostseпки dlya gruzovykh vagonov [Development and implementation of advanced draft gears for automatic couplers for freight cars]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering]. 2005, Iss. 12, pp. 20–24. (In Russian)

9. Keglin B. G., Nikol’skiy L. N., Strizhenok A. G. Uluchshenie konstruktssii pogloshchayushchikh apparatov [Improving the design of draft gears]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1980, Iss. 6, pp. 23–26. (In Russian)

10. Zhilkin V. A. *Modelirovanie i staticheskiy raschet elementov konstruktssiy v MSC PATRAN-NASTRAN-MARC: uchebnoe posobie* [Modeling and static analysis of structural elements in MSC PATRAN-NASTRAN-MARC: tutorial]. St. Petersburg: Prospekt Nauki Publ., 2016, 240 p. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/80063.html> (accessed: August 04, 2022). (In Russian)

Received: October 24, 2022

Accepted: February 06, 2023

#### Author’s information:

Sergey A. KRAVTSOV — Assistant;

[kravtsovs\\_bryansk@mail.ru](mailto:kravtsovs_bryansk@mail.ru)

Aleksey P. BOLDYREV — Dr. Sci. in Engineering,  
Professor; [apb.tubryansk@gmail.com](mailto:apb.tubryansk@gmail.com)

Fedor Yu. LOZBINEV — Dr. Sci. in Engineering,  
Professor; [flozbinev@yandex.ru](mailto:flozbinev@yandex.ru)

УДК 656.2.078.87

## Результаты освоения пассажирских перевозок на направлении Москва — Санкт-Петербург в кризисные 2020–2021 годы

Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман, Н. А. Рочев

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

**Для цитирования:** Бушуев Н. С., Шульман Д. О., Рочев Н. А. Результаты освоения пассажирских перевозок на направлении Москва — Санкт-Петербург в кризисные 2020–2021 годы // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 16–27. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-16-27

### Аннотация

**Цель:** Показать результаты освоения пассажирских перевозок железнодорожным и авиационным видами транспорта на направлении Москва — Санкт-Петербург, в том числе в кризисные 2020–2021 годы, в частности: проанализировать динамику изменения пассажиропотока поездов «Сапсан» и авиапотока на маршруте Москва — Санкт-Петербург, а также авиационный пассажиропоток внутренних воздушных линий аэропорта Пулково в доковидный, ковидный и постковидный периоды; разработать математическую модель прогнозирования пассажиропотока. **Методы:** Регрессионный анализ. **Результаты:** Показана динамика изменения пассажиропотока железнодорожного и авиационного видов транспорта на направлении Москва — Санкт-Петербург за период с 2010 по 2019 г.; предложена математическая модель прогнозирования пассажиропотока рассматриваемых видов транспорта до 2022 года; изучены тенденции изменения статистических данных пассажиропотока в ковидный и постковидный периоды в сравнении с ожидаемыми (прогнозными) значениями. **Практическая значимость:** Сделан вывод о целесообразности продолжения исследований в области прогноза пассажирских перевозок в условиях нестабильной ситуации в стране и в мире, а также в условиях сильной конкуренции между рассматриваемыми видами транспорта на направлении Москва — Санкт-Петербург. Результаты анализа могут быть рекомендованы к практическому использованию.

**Ключевые слова:** Пассажиропоток, пандемия Covid-19, железнодорожный транспорт, авиационный транспорт, направление Москва — Санкт-Петербург.

### Введение

На фоне пандемии Covid-19 [1] в российской и мировой экономике в 2020–2021 гг. наступил период рецессии, который затронул большую часть сфер деятельности, в том числе транспортную отрасль. Проанализируем основные результаты освоения пассажирских перевозок в кризисные 2020–2021 гг. на примере направления Москва — Санкт-Петербург.

Исследования показателей работы авиационного транспорта и поездов «Сапсан» на направле-

нии Москва — Санкт-Петербург [2–5] показали, что до пандемии, до официально объявленного локдауна в мире и России, наблюдался прирост пассажиропотока на данном направлении. В дальнейшем ситуация изменилась. Из-за пандемии Covid-19 весной 2020 г. был усилен санитарный контроль и постепенно введены ограничения на пассажирские перевозки. В ряде российских регионов был введен режим самоизоляции, большая часть предприятий переведена на удаленный режим работы. На рис. 1 представлена динамика

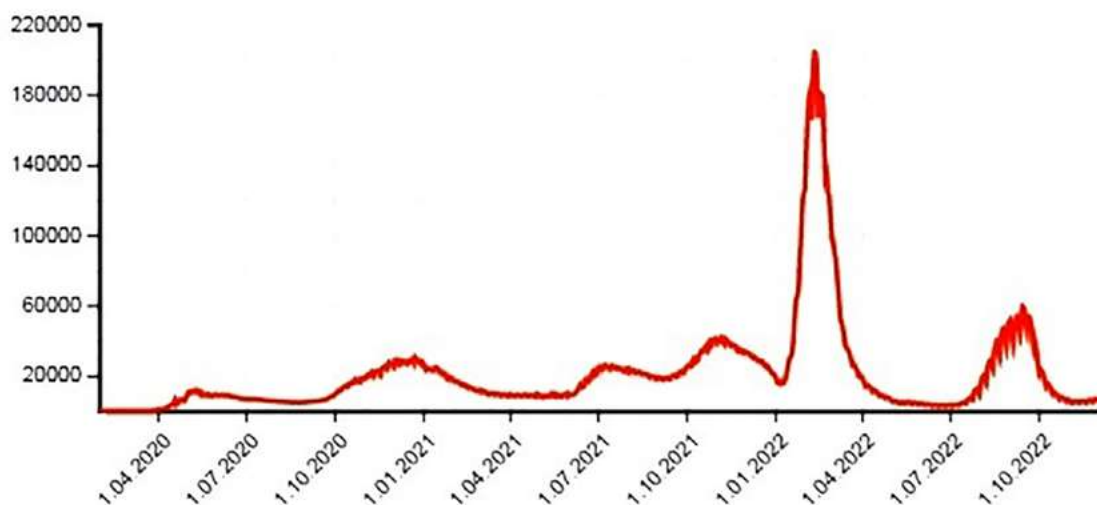


Рис. 1. Оперативные данные заболеваемости Covid-19 в России согласно portalу <https://стопкоронавирус.рф>

заболеваемости Covid-19 в сутки в России за период с 2020 по 2022 г.

Летом 2020 г. началось поэтапное снятие ограничений на железнодорожном транспорте. ОАО «РЖД» с целью соблюдения социальной дистанции запустило дополнительные поезда «Сапсан» на линии Москва — Санкт-Петербург [6]. Авиакомпании адаптировались к новым условиям в период пандемии (использование QR-кодов для бесконтактного взаимодействия, организация сервисов быстрой посадки Fast Track в предполетной зоне и другие меры предосторожности) [7].

Министерством здравоохранения РФ была выработана стратегия по выявлению инфицированных новой коронавирусной инфекцией, оказанию первой помощи, лечению и вакцинации. Несмотря на резкие скачки заболеваемости за период 2021–2022 гг. (рис. 1), более серьезные меры ограничений в российских городах и регионах не вводились.

### Анализ пассажиропотока железнодорожного транспорта

На рис. 2 представлены данные пассажиропотока на направлении Москва — Санкт-Петербург за весь период эксплуатации поездов «Сапсан»

[2–5, 8–13]. Из диаграммы видно, какое влияние на динамику пассажиропотока оказали введенные ограничения и опасения пассажиров, связанные с пандемией Covid-19.

Итак, за период с 2010 по 2017 г. пассажиропоток поездов «Сапсан» увеличился почти в 3 раза и достиг уровня 5,10 млн человек в год. Далее за период с 2017 по 2019 г. в условиях эксплуатации модернизированной существующей железнодорожной линии уровень пассажиропотока остается стабильно высоким (на уровне 5,1–5,2 млн человек в год). Спустя год, в период объявленного весной 2020 г. локдауна и неблагоприятной эпидемиологической ситуации в стране, величина пассажиропотока поездов «Сапсан» снижается до отметки 3,3 млн человек в год.

Позже, в 2021 г., мы наблюдаем рост пассажиропотока поездов «Сапсан» на 45 % относительно уровня 2020 г. (рис. 2). За 11 месяцев 2022 г. скоростные поезда перевезли 4,6 млн человек, что на 6,4 % больше, чем за аналогичный период 2021 г. [10]. При этом нужно отметить, что основные пики заболеваемости вирусом SARS-CoV-2 в России затронули и 2022 г. (рис. 1). Можно предположить, что показатели пассажирской работы поездов «Сапсан» на маршруте Москва — Санкт-

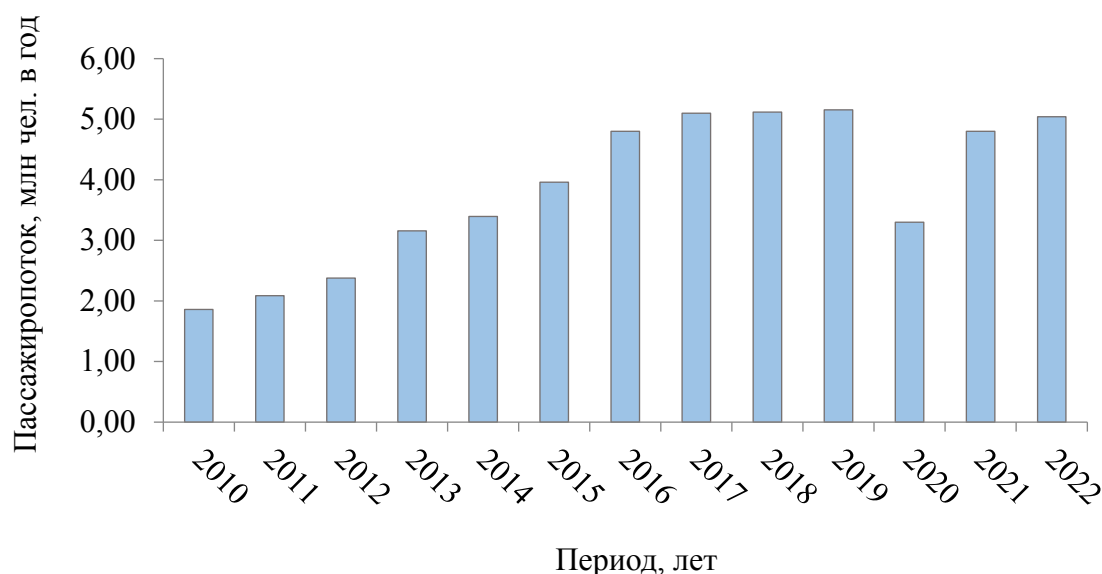


Рис. 2. Динамика пассажиропотока поездов «Сапсан» на направлении Москва — Санкт-Петербург. Примечание: объем перевозок за 2022 год будет откорректирован после уточнения предварительных данных

Санкт-Петербург постепенно восстанавливаются, возвращаясь на прежний доковидный уровень. В связи с этим интересным представляется дальнейший анализ пассажирской работы на данном направлении.

На рис. 3 представлены результаты прогноза пассажиропотока поездов «Сапсан» до 2022 г. (с обработкой статистических данных допандемийного периода) в сравнении с показателями пассажирской работы на данном направлении в пандемийный и постпандемийный периоды.

Полученное уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$y = 0,4241 \cdot x + 1,3674, R^2 = 0,96, \quad (1)$$

где  $x$  — номер наблюдения, соответствующий году;

$R^2$  — коэффициент детерминации.

Для оценки параметров регрессионной модели использован классический метод наименьших квадратов. Расчет коэффициента детерминации  $R^2$  позволяет дать качественную оценку

уравнению, чем ближе значение коэффициента к единице, тем выше степень зависимости между переменными.

На графике рис. 3 наблюдается сильное отклонение величины пассажиропотока в 2020 г. (соответствует наблюдению № 11) относительно прогнозируемой величины (на 45 %). В последующие два года (наблюдения № 12, 13) показатели пассажиропотока поездов «Сапсан» также расходятся со значениями прогнозируемых величин, на 26 % в 2021 г. и 27 % в 2022 г. соответственно, несмотря на то, что статистические данные за эти годы достигли доковидного уровня. В связи с этим целесообразны дальнейшее наблюдение за итогами восстановления пассажиропотока и анализ новых статистических данных с целью корректировки полученных данных.

Очевидно, необходимым является расчет перспективного пассажиропотока поездов «Сапсан» на маршруте Москва — Санкт-Петербург и с учетом прогноза исчерпания пропускной способности существующей железнодорожной инфраструктуры главного Октябрьского хода, особенно



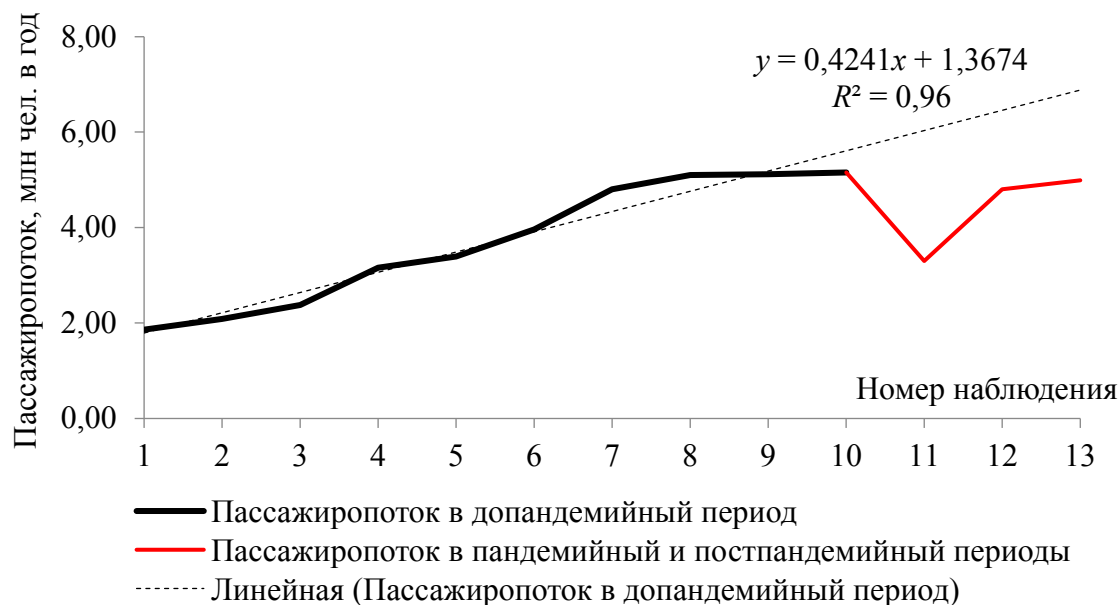


Рис. 3. Анализ пассажиропотока поездов «Сапсан» за период с 2010 по 2022 г.

в условиях конкуренции железнодорожного и авиатранспорта на данном направлении.

Кроме того, сегодня мы задаемся еще одним важным вопросом: какова судьба скоростных электропоездов «Сапсан» производства немецкой компании Siemens в нынешних политических условиях? Более чем десятилетний опыт эксплуатации скоростных поездов доказал неплохую адаптацию этих составов к инфраструктуре и закрепил стабильно высокие результаты показателей пассажиропотока на маршруте Москва — Санкт-Петербург, составив серьезную конкуренцию авиатранспорту. Сегодня скоростным «Сапанам» по критерию «Время в пути от двери до двери» альтернативы на данном направлении нет. Ожидает ли нас увеличение стоимости проездного билета в ближайшее время? Будут ли завтра поездки на поездах «Сапсан» столь же безопасными? Не прекратят ли «Сапсаны» свою работу в России в условиях санкций? Вернется ли наша страна к отечественным научным школам и существующим разработкам по созданию высокоскоростного поезда, возродив эту научную нишу транспортной отрасли? Будет ли построен новый

выделенный высокоскоростной железнодорожный путь между двумя деловыми столицами?

### Анализ пассажиропотока авиационного транспорта

Обратимся к еще одному ключевому сектору транспортной отрасли — гражданской авиации. Сегодня результаты финансовых убытков в российской авиации не опубликованы. Эксперты считают, что восстановление пассажиропотока, а соответственно, и финансовых показателей напрямую зависит от того, будет ли открыто международное авиасообщение, которое является основным источником доходов аэропорта [14, 15]. Согласно исследованиям зарубежного источника Международной ассоциации воздушного транспорта (IATA) [15, 16], спад пассажиропотока в авиации с учетом прогнозирования экономического развития в пандемийный период будет полностью компенсирован ускоренным восстановительным ростом в течение следующих нескольких лет — десятилетия. Анализ мировой авиастатистики и результаты прогноза пассажирооборота представлены на рис. 4 [15–17].

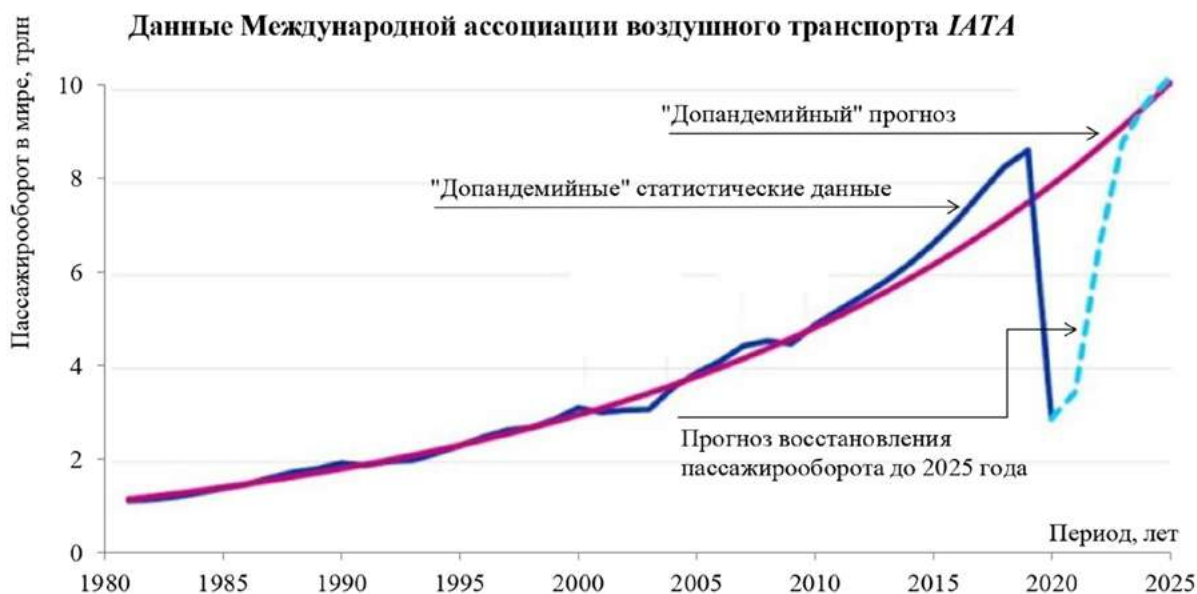


Рис. 4. Результаты прогноза пассажирооборота мировой авиации, источник IATA [15–17]

Известно, что в предыдущие два десятилетия мировая гражданская авиация неоднократно сталкивалась с глобальными экономическими кризисами, восстанавливая впоследствии предыдущие показатели работы [16, 17]: трагедия 11 сентября 2001 г. и кризис в гражданской авиации; эпидемия птичьего гриппа в 2003 г.; мировой финансовый кризис 2008 года (рис. 4). Рассматриваемый период — это новый вызов — пандемия Covid-19, которая стала одной из самых смертоносных в истории (по состоянию на 12 декабря 2022 г. зарегистрировано свыше 649 млн случаев заболевания в мире) [17, 18].

Сегодня внутренний пассажиропоток российской авиации восстанавливается быстрее, чем в таких крупных странах, как США и Китай [16, 17]. Этого нельзя сказать о международных перевозках — восстановление ожидается более длительным, в том числе ввиду современной нестабильной политической ситуации.

Мировая потребность к 2025 г. достигнет 10 млрд пассажиров в год согласно опубликованным результатам исследований [15, 16], а популярный в пандемию лоукост-сегмент (лоуко-

стеры — авиакомпании с дешевыми билетами при сравнительно небольшом расстоянии дальности полета) станет самым быстрорастущим сегментом авиационного рынка, в том числе и в России.

Проанализируем, каким образом ковидные ограничения отразились на работе аэропорта Пулково. Также ли существенны потери пассажиропотока на авиатранспорте в кризисные годы, как это произошло на железнодорожном транспорте?

На рис. 5 представлены показатели пассажирской работы аэропорта Пулково за период с 2014 по 2022 г., в частности общий пассажиропоток, пассажиропоток на внутренних воздушных линиях (ВВЛ) аэропорта Пулково, пассажиропоток на маршруте Москва — Санкт-Петербург (за исключением отсутствующих данных за 2018 и 2021 гг.) [2–5, 14, 18].

Согласно данным ООО «Воздушные ворота Северной столицы», за период с 2014 по 2016 г. наблюдался спад общего пассажиропотока аэропорта, несмотря на положительную динамику на внутренних воздушных линиях (ВВЛ). В последующие три года отмечается резкий рост величины пассажиропотоков, общего и ВВЛ. Рекорд-

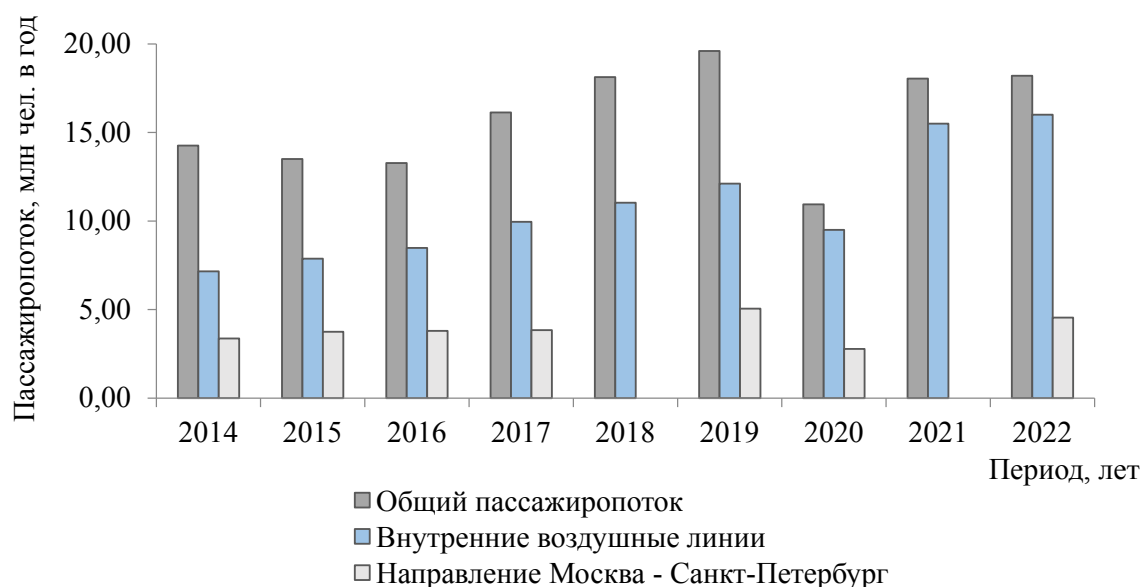


Рис. 5. Динамика пассажиропоптока аэропорта Пулково за период с 2014 по 2022 г.



Рис. 6. Динамика изменения доли перевозок на международных и внутренних направлениях в общем пассажиропоптоке аэропорта Пулково за период с 2014 по 2022 г.

ное значение общего пассажирского трафика пришлось на 2019 г. (19,6 млн человек), несмотря на то, что предшествующий 2018 год — год проведения в России чемпионата мира по футболу. Тогда, с 13 июня по 15 июля 2018 г., аэропорт Пулково обслужил рекордные 2,2 млн, а объем пассажирских перевозок на внутренних воздушных линиях составил 55 % [14, 18]. Пик нагрузки на инфраструктуру воздушной гавани пришелся на 11 июля, аэропорт Санкт-Петербурга обслужил 75 тысяч пассажиров, суммарно 884 рейса на прилет и вылет.

По оценке экспертов [14, 15], по итогам 2020 г., в авиации наибольшее снижение пришлось на международные перевозки (рис. 6). Из российских направлений больше всего «пострадала» Москва, аэропорт потерял многих транзитных пассажиров.

В 2021 г. установлен абсолютный исторический рекорд на внутрироссийских авиалиниях аэропорта Пулково — перевезено 15,5 млн человек. По итогам 2022 г. воздушная гавань заняла третье место по объему пассажиропоптока среди российских аэропортов, аэропорт обслужил 18,2 млн пассажиров, из них 16 млн — на ВВЛ.

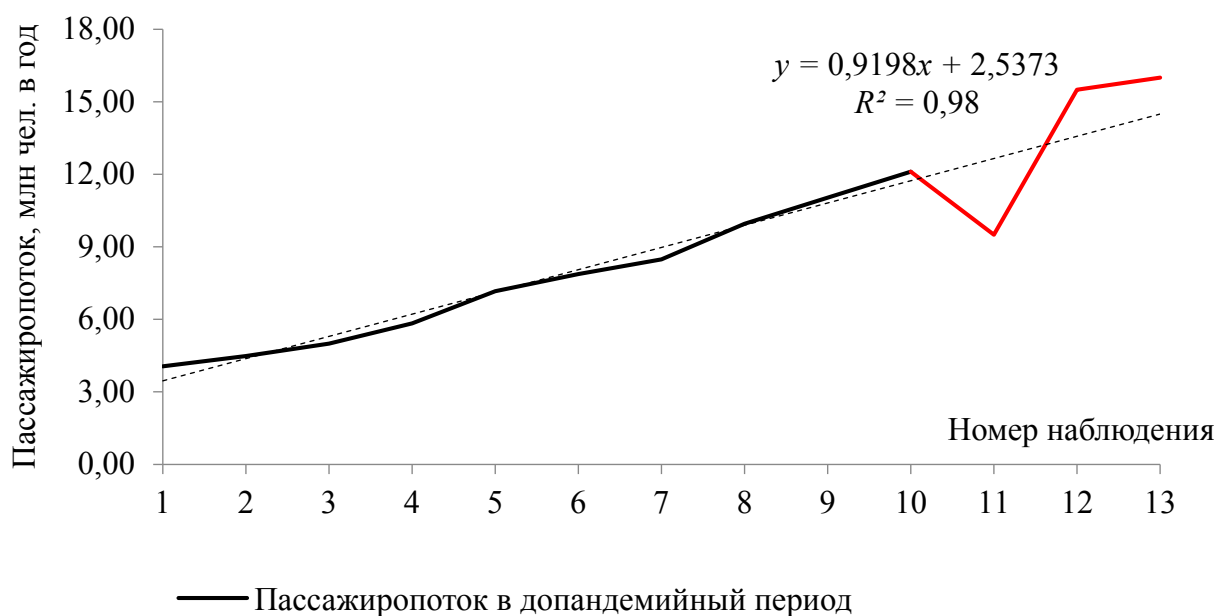


Рис. 7. Анализ пассажиропотока авиатранспорта на ВВЛ за период с 2010 по 2022 г.

Самым популярным направлением на внутренних воздушных линиях аэропорта Северной столицы является Москва. Интересным представляется следующая закономерность: за период с 2010 по 2016 г. доля перевозок на популярном маршруте между двумя деловыми столицами составляла 50 % (плюс-минус) от общего пассажиропотока на ВВЛ аэропорта Пулково. В 2017 и 2019 гг. процент снизился до 39 % и 42 % соответственно. В 2020 и 2022 гг. этот процент опустился до рекордных 29 % (рис. 5). Проанализируем пассажиропоток до 2022 г. на внутренних воздушных линиях аэропорта Пулково и сравним показатели с данными пассажирской работы в пандемийный и постпандемийный периоды (рис. 7).

Полученное уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$y = 0,9198 \cdot x + 2,5373, R^2 = 0,98, \quad (2)$$

где  $x$  — номер наблюдения, соответствующий году;

$R^2$  — коэффициент детерминации.

На графике рис. 7, так же как и на рис. 3, наблюдается снижение величины пассажиропотока в 2020 г. (наблюдение № 11) относительно прогнозируемой величины (на 25 %). Однако в последующие два года (наблюдения № 12, 13) пассажиропоток авиатранспорта на ВВЛ не только восстановился до прежнего доковидного уровня, но и значительно превысил ожидаемые цифры (на 14 % в 2021 году и 10 % в 2022 году соответственно). При дополнении новых статистических данных целесообразно дальнейшее наблюдение и анализ за динамикой развития авиапотока пассажиров.

Проанализируем соотношение темпов потерь пассажиропотоков авиатранспортом аэропорта Пулково (ВВЛ и направление Москва — Санкт-Петербург) и поездами «Сапсан» (направление Москва — Санкт-Петербург) за период с 2019 по 2020 г. (относительно 2019 г.), а также скорость восстановления пассажиропотоков по тем же критериям за период с 2020 по 2022 г. (относительно 2020 и 2021 гг.). Результат в процентном соотношении представлен в таблице.

Анализ пассажирских перевозок за период с 2019 по 2022 г. на направлении Москва — Санкт-Петербург

| № п/п                           | Период    | Вид транспорта                                                 |                                                       |                                                         |
|---------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                 |           | авиатранспорт на внутренних воздушных линиях аэропорта Пулково | авиатранспорт на направлении Москва — Санкт-Петербург | поезда «Сапсан» на направлении Москва — Санкт-Петербург |
| Пассажиропоток, млн чел.        |           |                                                                |                                                       |                                                         |
| 1                               | 2019      | 12,11                                                          | 5,06                                                  | 5,15                                                    |
| 2                               | 2020      | 9,50                                                           | 2,78                                                  | 3,30                                                    |
| 3                               | 2021      | 15,50                                                          | —                                                     | 4,80                                                    |
| 4                               | 2022      | 16,00                                                          | 4,55                                                  | 5,04                                                    |
| Показатель спада за период, %   |           |                                                                |                                                       |                                                         |
| 5                               | 2019/2020 | 21,6                                                           | 45,1                                                  | 35,9                                                    |
| Показатель подъема за период, % |           |                                                                |                                                       |                                                         |
| 6                               | 2020/2021 | 63,2                                                           | —                                                     | 45,5                                                    |
| 7                               | 2020/2022 | 68,4                                                           | 63,7                                                  | 52,7                                                    |
| Стабилизация динамики, %        |           |                                                                |                                                       |                                                         |
| 8                               | 2021/2022 | 3,2                                                            | —                                                     | 5,0                                                     |

*Примечание:* статистические данные по авиаперевозкам пассажиров на направлении Москва — Санкт-Петербург за 2021 г. отсутствуют и будут проанализированы позже.

## Заключение

За период с 2019 по 2020 г. потеря объемов пассажирских перевозок на маршруте Москва — Санкт-Петербург в авиации составила 45,1 %, а на поездах «Сапсан» — 35,9 %. Период 2020/2021 отмечен высокими темпами восстановления пассажиропотока как на железнодорожном рассматриваемом направлении, так и на внутренних воздушных линиях аэропорта Пулково. Причем показатель пассажиропотока в авиации на ВВЛ бьет рекордные максимумы. Для периода 2021/2022 характерна стабилизация объемов пассажиропотоков, незначительное увеличение на уровне 3–5 %.

Итоги кризисного периода с 2019 по 2022 г. оказали сильное влияние на работу транспортного сектора, произошли масштабные социально-экономические, а также политические перемены в России. Сегодня мы наблюдаем «оживление» отрасли на рынке пассажирских перевозок, что особенно актуально в условиях продолжающейся нестабильной ситуации в стране и в мире. Это в

очередной раз подчеркивает важность исследований в области железнодорожных и авиационных пассажирских перевозок, не только на примере маршрута Москва — Санкт-Петербург в условиях сильнейшей конкуренции, но и на других российских направлениях.

## Библиографический список

1. Novel coronavirus (2019-nCoV). WHO/Europe. — URL: <https://www.who.int/europe/> (дата обращения: 01.12.2022).
2. Шульман Д. О. Обоснование этапности формирования перспективной сети высокоскоростных железнодорожных магистралей: дисс. ... канд. техн. наук / Д. О. Шульман. — СПб., 2015. — 147 с.
3. Бушуев Н. С. Анализ динамики пассажиропотока поездов «Сапсан» и авиационного транспорта на линии «Москва — Санкт-Петербург» до 2025 г. / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман, К. М. Сагайдак // Бюллетень результатов научных исследований. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Вып. 1. — С. 5–14. — URL: <http://brni.info/archive/2019/1.html>.



4. Bushuev N. Modeling of container freight and passenger traffic / N. Bushuev, D. Shulman, K. Sagajdak // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 403, 2019 XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry 10–13 September, 2019, Don State Technical University, Russian Federation. — № 012226. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012226>.
5. Бушуев Н. С. Оценка перспектив развития высокоскоростного железнодорожного и авиационного транспорта на направлении Москва — Санкт-Петербург / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2017): сборник трудов второй Международной научно-практической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. — С. 219–222.
6. РЖД запустят дополнительные «Сапсаны» для соблюдения социальной дистанции // Данные сайта «РБК». — URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5ebff7fe9a7947242edd12fa> (дата обращения: 04.12.2022).
7. Как пандемия изменила российские аэропорты // Данные сайта «Ведомости». — URL: <https://www.vedomosti.ru/salesdepartment/2021/03/15/kak-pandemiya-izmenila-rossiiskie-aeroporti> (дата обращения: 05.12.2022).
8. Перевозки пассажиров поездами «Сапан» в 2019 году выросли на 4 % // Гудок. — 10 января 2020 г. — URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1489790>.
9. Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Агентство внешнего транспорта» // Данные транспортно-логистического комплекса Санкт-Петербурга. — URL: <http://avt.spb.ru/transportno-logisticheskij-kompleks-sankt-peterburga/otraslevaja-statistika>.
10. За 11 месяцев 2022 года между Петербургом и Москвой «Сапан» перевез 4,6 миллиона пассажиров // Официальное сетевое издание правительства Санкт-Петербурга. — 17 декабря 2022. — URL: <https://spbndnevnik.ru/news/2022-12-17/za-11-mesyatsev-2022-goda-mezhdu-peterburgom-i-moskvoy-sapsan-perevez-46-millionov-passazhirov>.
11. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт и перспективы его развития в мире / И. П. Киселев // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 3, 4, 5(40, 41, 42). — С. 40–41, 61–65, 44–51.
12. Бушуев Н. С. Оценка востребованности высокоскоростной железнодорожной магистрали на полигоне Санкт-Петербург — Москва / Н. С. Бушуев, Д. О. Мищенко // Известия ПГУПС. — СПб.: ПГУПС, 2013. — Вып. 2(35). — С. 5–11.
13. Бушуев Н. С. О перспективах развития высокоскоростных железнодорожных магистралей в России / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман // Бюллетень результатов научных исследований. — СПб.: ПГУПС, 2017. — Вып. 3. — С. 7–14. — URL: [http://brni.info/archive/2017/3-\(24\).html](http://brni.info/archive/2017/3-(24).html).
14. В Пулково оценили масштабы потерь в 2020 году // Данные портала РБК. — 13 января 2021 г. — URL: [https://www.rbc.ru/spb\\_sz/13/01/2021/5ffe975e9a7947b8bfe777a7](https://www.rbc.ru/spb_sz/13/01/2021/5ffe975e9a7947b8bfe777a7).
15. Air Passenger Numbers to Recover in 2024. — URL: <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>.
16. Данные портала Aviastat.ru. — URL: <https://www.aviastat.ru/analytics/108-osobennosti-rynka-passazhirskih-i-gruzovyh-aviaperevozok-v-period-pandemii> (дата обращения: 12.12.2022).
17. COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU). Johns Hopkins University. — URL: <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/dashboards/bda7594740fd40299423467b48e9ecf> (дата обращения: 12.12.2022).
18. Данные аэропорта Пулково. — URL: [https://pulkovoirport.ru/about/about\\_pulkovo/performance/](https://pulkovoirport.ru/about/about_pulkovo/performance/) (дата обращения: 02.12.2022).
- Дата поступления: 01.02.2023  
Решение о публикации: 20.02.2023
- Контактная информация:**  
БУШУЕВ Николай Сергеевич — канд. техн. наук, проф.; [2009bushuev@rambler.ru](mailto:2009bushuev@rambler.ru)  
ШУЛЬМАН Дарина Олеговна — канд. техн. наук, доц.; [shulman@pgups.ru](mailto:shulman@pgups.ru)  
РОЧЕВ Николай Анатольевич — аспирант; [rotchev\\_na@mail.ru](mailto:rotchev_na@mail.ru)

## Mastering Results for Passenger Transportation on Moscow — St. Petersburg Direction in Crisis 2020–2021

N. S. Bushuev, D. O. Shulman, N. A. Rochev

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

**For citation:** Bushuev N. S., Shulman D. O., Rochev N. A. Mastering Results for Passenger Transportation on Moscow — St. Petersburg Direction in Crisis 2020–2021 // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 16–27. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-16-27

### Summary

**Purpose:** To show mastering results for passenger transportation by rail and air kinds of transport on Moscow — St. Petersburg direction including ones at crisis 2020–2021, in particular: to analyze the dynamics of changes in passenger traffic of Sapsan trains and air traffic on Moscow — St. Petersburg route as well as of air passenger traffic of domestic air lines of Pulkovo Airport in pre-Covid, Covid and post-Covid periods; to develop mathematical model for passenger traffic forecast. **Methods:** Regression analysis. **Results:** The dynamics of passenger traffic changes of railway and air kinds of transport on Moscow–St. Petersburg direction for 2010 to 2019 period has been shown; mathematical model to forecast passenger traffic of being considered kinds of transport till 2022 has been developed; the tendencies for passenger traffic statistical data changes at Covid and post-Covid periods in comparison with expected (forecasted) values have been studied. **Practical significance:** Conclusion about the expediency of research continuation on passenger traffic forecast in unstable situation conditions in the country and the world as well as in the conditions of strong concurrence between being considered kinds of transport on Moscow — St. Petersburg direction has been made. The analysis results can be recommended for practical use.

**Keywords:** Passenger traffic, Covid-19, rail transport, air transport, Moscow — St. Petersburg direction.

### References

1. Novel coronavirus (2019-nCoV). WHO/Europe. Available at: <https://www.who.int/europe/> (accessed: December 01, 2022).
2. Shul'man D. O. *Obosnovanie etapnosti formirovaniya perspektivnoy seti vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей: disc. ... kand. tekhn. nauk* [Substantiation of the stages of formation of a promising network of high-speed railway lines: dIss. ... cand. tech. sciences]. St. Petersburg, 2015, 147 p. (In Russian)
3. Bushuev N. S., Shul'man D. O., Sagaydak K. M. Analiz dinamiki passazhiropotoka poezdov "Sapsan" i aviatsionnogo transporta na linii "Moskva — Sankt-Peterburg" do 2025 g. [Analysis of the dynamics of the passenger traffic of Sapsan trains and air transport on the Moscow — St. Petersburg line until 2025]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, vol. 1, pp. 5–14. Available at: <http://brni.info/archive/2019/1.html>. (In Russian)
4. Bushuev N., Shulman D., Sagajdak K. Modeling of container freight and passenger traffic. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 403, 2019 XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry 10–13 September, 2019, Don State Technical University, Russian Federation. № 012226. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012226>.
5. Bushuev N. S., Shul'man D. O. *Otsenka perspektiv razvitiya vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo i aviatsionnogo transporta na napravlenii Moskva — Sankt-Peterburg. Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (RILTTRANS-2017): sbornik trudov vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Evaluation of the prospects for the development of high-speed rail and air transport in the direction Moscow — St. Petersburg. Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (RILTTRANS-2017): collection of works of the second International scientific-practical conference].

St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2018, pp. 219–222. (In Russian)

6. RZhD zapustyat dopolnitel'nye "Sapsany" dlya soblyudeniya sotsial'noy distantsii [Russian Railways will launch additional Sapsan to maintain social distance]. *Dannye sayta "RBK"* [RBC website data]. Available at: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5ebff7fe9a7947242edd12fa> (accessed: December 04, 2022). (In Russian)

7. Kak pandemiya izmenila rossiyskie aeroporti [How the pandemic has changed Russian airports]. *Dannye sayta "Vedomosti"* [Vedomosti website data]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/salesdepartment/2021/03/15/kak-pandemiya-izmenila-rossiiskie-aeroporti> (accessed: December 05, 2022). (In Russian)

8. Perevozki passazhirov poezdami "Sapsan" v 2019 godu vyrosli na 4 % [Passenger transportation by Sapsan trains increased by 4 % in 2019]. *Gudok. 10 yanvarya 2020 g.* [Gudok. January 10, 2020]. Available at: <https://gudok.ru/news/?ID=1489790>. (In Russian)

9. Sankt-Peterburgskoe gosudarstvennoe kazennoe uchrezhdenie "Agentstvo vneshnego transporta" [St. Petersburg State Institution "External Transport Agency"]. *Dannye transportno-logisticheskogo kompleksa Sankt-Peterburga* [Data of the transport and logistics complex of St. Petersburg]. Available at: <http://avt.spb.ru/transportno-logisticheskij-kompleks-sankt-peterburga/otraslevaya-statistika>. (In Russian)

10. Za 11 mesyatsev 2022 goda mezhdu Peterburgom i Moskvoy "Sapsan" perevez 4,6 milliona passazhirov [For 11 months of 2022, Sapsan carried 4.6 million passengers between St. Petersburg and Moscow]. *Ofitsial'noe setevoe izdanie pravitel'stva Sankt-Peterburga. 17 dekabrya 2022* [Official online edition of the government of St. Petersburg. December 17, 2022]. Available at: <https://spbdnevnik.ru/news/2022-12-17/za-11-mesyatsev-2022-goda-mezhdu-peterburgom-i-moskvoy-sapsan-perevez-46-millionov-passazhirov>. (In Russian)

11. Kiselev I. P. Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport i perspektivy ego razvitiya v mire [High-speed rail transport and prospects for its development in the world]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2012, Iss. 3, 4, 5(40, 41, 42), pp. 40–41, 61–65, 44–51. (In Russian)

12. Bushuev N. S., Minenko D. O. Otsenka vostrebovanosti vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali na poligone Sankt-Peterburg — Moskva [Estimation of the

demand for a high-speed railway line at the St. Petersburg — Moscow test site]. *Izvestiya PGUPS* [Izvestiya PGUPS]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2013, vol. 2(35), pp. 5–11. (In Russian)

13. Bushuev N. S., Shul'man D. O. O perspektivakh razvitiya vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralei v Rossii [On the prospects for the development of high-speed railway lines in Russia]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, vol. 3, pp. 7–14. Available at: [http://brni.info/archive/2017/3-\(24\).html](http://brni.info/archive/2017/3-(24).html). (In Russian)

14. V Pulkovo otsenili masshtaby poter' v 2020 godu [Pulkovo assessed the scale of losses in 2020]. *Dannye portala RBK. 13 yanvarya 2021 g.* [RBC portal data]. Available at: [https://www.rbc.ru/spb\\_sz/13/01/2021/5ffe975e9a7947b8bfe777a7](https://www.rbc.ru/spb_sz/13/01/2021/5ffe975e9a7947b8bfe777a7). (In Russian)

15. Air Passenger Numbers to Recover in 2024. Available at: <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>.

16. *Dannye portala Aviastat.ru* [Data from the portal Aviastat.ru]. Available at: <https://www.aviastat.ru/analytics/108-osobennosti-rynka-passazhirskih-i-gruzovyh-aviaperevozok-v-period-pandemii> (accessed: December 12, 2022). (In Russian)

17. COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU). Johns Hopkins University. Available at: <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/dashboards/bda75947-40fd40299423467b48e9ecf> (accessed: December 12, 2022).

18. *Dannye aeroporta Pulkovo* [Pulkovo airport data]. Available at: [https://pulkovoairport.ru/about/about\\_pulkovo/performance/](https://pulkovoairport.ru/about/about_pulkovo/performance/) (accessed: December 02, 2022). (In Russian)

Received: February 01, 2023

Accepted: February 20, 2023

#### Author's information:

Nikolay S. BUSHUEV — PhD in Engineering, Professor; 2009bushuev@rambler.ru

Darina O. SHULMAN — PhD in Engineering, Associate Professor; shulman@pgups.ru

Nikolay A. ROCHEV — Postgraduate Student; rochev\_na@mail.ru

УДК 656.01: 338.47

## Математическая модель и способ расчета пропускной способности

М. А. Марченко

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

**Для цитирования:** Марченко М. А. Математическая модель и способ расчета пропускной способности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 28–37. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-28-37

### Аннотация

**Цель:** Предложить методику расчета наличной пропускной способности на железнодорожной линии с полным учетом влияния разгонов и торможений поездов в пути их следования на результирующую наличную пропускную способность. **Методы:** Применен метод аналитического обзора, имитационного и динамического моделирования, математическое моделирование. **Результаты исследования:** Произведены аналитические преобразования общеизвестной формулы расчета пропускной способности. Получена аналитическая формула, позволяющая с более высокой точностью производить вычисления наличной пропускной способности. **Практическая значимость:** Результаты исследования могут быть использованы в диспетчерских центрах управления перевозками ОАО «РЖД» для более полного анализа работы полигона дороги, железнодорожных линий или отдельных участков с целью развернутого анализа выполненной работы по перевозкам.

**Ключевые слова:** Железнодорожный полигон, пропускная способность, межпоездной интервал, непараллельный график движения, скорость движения.

### Введение

Проблематика данной работы заключается в разработке методики расчета наличной пропускной способности, в основу которой заложены известные формулы расчета наличной пропускной способности, главным нововведением которых является учет времени, затрачиваемого поездами на разгон и замедление в пути следования. В настоящее время в процессе расчета наличной пропускной способности используется формальный подход к определению коэффициентов съема, а также принимается в расчет участковая скорость, рассчитываемая с учетом разгонов и замедлений, но представляющая собой лишь отношение длины определенного участка железнодорожного полигона ко времени следования по нему поезда. В работе предлагается комплексная методика определения участковой скорости с

дифференцированием расстояний проследуемых поездом участков по времени как при разгоне, так и при замедлении. Результаты предложенной методики позволяют с большей точностью определить пропускную способность железнодорожной линии, что, в свою очередь, позволяет оптимизировать эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

В работе представлена существующая формула расчета наличной пропускной способности, показана ее связь с участковой скоростью и представлен подробный ее расчет по предложенной методике. Результаты расчетов верифицированы имитационным моделированием в программном комплексе AnyLogic.

## 1. Анализ научной литературы рассматриваемой проблематики

В работе под названием «Особенности определения пропускной способности двухпутных участков» Ж. Я. Абдуллаевым была рассмотрена проблематика повышения точности и эффективности расчета пропускной способности на железнодорожных линиях. В его работе представлена подробная классификация используемых в настоящее время способов определения пропускной способности железнодорожных линий (аналитический, графоаналитический и метод имитационного моделирования). Автором приведены и подробно проанализированы аналитические формулы, используемые для вычисления значений наличной пропускной способности и рассмотрены ограничения (отсутствие пересечения на графике грузового и высокоскоростного поезда во встречном движении). В работе присутствует научная новизна в виде нового способа прокладки ниток графика, что позволяет обеспечить пропуск большего количества поездов и повысить наличную пропускную способность. Серьезным недостатком в работе является отсутствие имитационной модели, что не позволяет наглядно продемонстрировать движение поездов и верифицировать полученные результаты [1].

Кандидат физико-математических наук П. П. Бобрик в своей работе под названием «Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте» [2] рассматривал движение транспортных средств по специализированным ниткам графика и скорость возрастания заторов на основе методики применения систем массового обслуживания. Научной новизной в работе является понятие плотности потока. В отношении железнодорожного транспорта данное исследование применимо в рамках определения задержек поездов при обгонах и скрещиваниях, а также обеспечении минимального межпоездного интервала и влияния этих факторов

на результирующую пропускную способность по всему железнодорожному полигону. В работе выявлена скорость возрастания заторов, приводящая к снижению пропускной способности железнодорожной линии и полигона в целом. Автором предложена формула расчета увеличения среднего времени простоя, для снижения которого предложена идея проектирования резервных станций, расстояние между ними находится в связке с показателем плотности потока и обратно пропорционально ему. В ходе исследований были получены данные о неизбежном снижении резервных мощностей при исчерпании пропускной способности железнодорожного полигона. Данная статья может быть полезной для настоящей работы наличием формул, описывающих возрастание заторов на железнодорожном пути.

Следует также упомянуть о работе зарубежного автора. В своей статье под названием «Визуальное интерактивное моделирование и имитационное моделирование как поддержка принятия решений в логистических операциях железнодорожного транспорта» специалист в области железнодорожного высокоскоростного движения Влатко Черич [3] рассмотрел проблему определения пропускной способности железнодорожной линии с применением инструментов интерактивного моделирования существующего железнодорожного полигона в Боснии от Венгрии через Хорватию. В ходе выполнения исследований автором была построена имитационная модель, наглядно отражающая работу железнодорожного комплекса, направленную на бесперебойный пропуск поездов и обслуживание пассажиров. Модель позволяет произвести комплексную оценку этой работы и получить данные по количеству пропущенных пар поездов в течение заданного промежутка времени. Модель выполнена в программной среде ServiceModel, позволяющей помимо интерактивного производить построение модели в режиме планирова-

ния, что позволяет в случае реализации данной модели в подобном режиме производить прогнозирование размеров движения и на основе полученных данных осуществлять построение плана формирования поездов.

Работы по расчету пропускной способности железнодорожных магистралей представлены в работах [4–9], а также в иностранных литературных источниках [10–16].

В работах [17–19] изучаются особенности транспортно-логистической инфраструктуры, влияющие на пропускную способность железнодорожного транспорта в целом. В работах [20–23] проводится оценка клиентоориентированности логистических систем, построенных с учетом требований как отдельного клиента, так и рынка. В работах [24, 25] приводится технико-экономический инструментarium нормирования работы сложных систем доставки с проведением логистического аудита/независимой оценки пропускной способности элементов транспортно-логистических систем.

Влияние на пропускную способность железнодорожных линий во многом оказывают геополитические и экономические условия, о чем указывается в работах [26, 27], а также степень цифровизации основных бизнес-процессов на транспорте и в логистике [28, 29]. Кроме того, сама система применяемого ситуационного управления перевозочным процессом определяет загруженность железнодорожных линий и целых направлений [30–32], а также финансовая модель управления перевозками [33–35], что следует принимать во внимание при расчете пропускной способности.

## 2. Анализ существующих методов расчета пропускной способности

В настоящее время для определения наличной пропускной способности железнодорожных линий используется формула (1) [36], приведенная ниже.

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}})}{I_p} \cdot \alpha_n, \quad (1)$$

где  $t_{\text{техн}}$  — бюджет времени на содержание и ремонт инфраструктуры;

$I_p$  — расчетный межпоездной интервал;

$\alpha_n$  — коэффициент надежности работы инфраструктуры и подвижного состава, принимаем равным 0,96 [1].

Межпоездной интервал формулы (1) определяем по формуле (2) [1]:

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{n2} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{n1}}{V_{\text{ср}} \cdot 16,7} + t_{\text{в}}, \quad (2)$$

где  $L_{n1}$ ,  $L_{n2}$  — длина соответственно впереди и позади идущего поезда;

$L_{\text{бл1}}$ ,  $L_{\text{бл2}}$  — длина соответственно первого и второго по счету блок-участков относительно впереди идущего поезда;

$V_{\text{ср}}$  — средняя скорость следования поездов по блок-участкам;

$t_{\text{в}}$  — время на восприятие изменения показания светофора, принимаем равным 0,05 мин.

При расчетах значение по формуле (2) получают, опираясь на данные о средней скорости следования поезда по участку, куда не входит время на разгон, замедление и стоянки, но при этом происходит его обобщение, в результате чего расчетный результат может отличаться от фактического. Предлагаемая методика позволяет учесть вышеперечисленные факторы и свести данное расхождение к минимуму, что позволит получить расчетный результат, наиболее приближенный к фактическому.

Следует упомянуть, что не будет верным решением использовать максимально разрешенную скорость в качестве ходовой, поскольку скорость поезда на участке зависит от различных факторов: от плана и профиля пути, устройств



СЦБ, характеристик верхнего строения пути и подвижного состава. По этой причине ходовая скорость представляет собой усредненную величину, а предлагаемая методика позволяет повысить точность ее определения. Расчеты по ней выполняются для категории поездов, время хода которых по рассматриваемой линии минимально, затем выполняем аналогичные расчеты с прочими категориями, через коэффициент съема производим расчет пропускной способности.

Уравнение движения поезда можно представить следующим образом в дифференциальном виде:

$$S_{\text{общ}} = \frac{dv}{dt} t_{\text{разг}} + v_{\text{пост}} \cdot t_{\text{пост}} + \frac{dv}{dt} t_{\text{зам}};$$

при  $t_{\text{разг}} + t_{\text{пост}} + t_{\text{зам}} = t_{\text{общ}}$ , (3)

где  $\frac{dv}{dt}$  — показатель скорости изменения пере-

мещения поезда за промежуток времени;

$t_{\text{разг}}$  — время на увеличение скорости;

$v_{\text{пост}}$  — скорость следования поезда при отсутствии ее изменения;

$t_{\text{пост}}$  — время на перемещение поезда с постоянной скоростью;

$t_{\text{зам}}$  — время на снижение скорости.

Определим время на следование поезда без изменения скорости. Исходными данными служат общее расстояние пути следования и время на преодоление заданного расстояния и времени на разгон и замедление. Выполним расчет средней скорости поезда в пути следования (4):

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{общ}}}{t_{\text{общ}}}. \quad (4)$$

$$t_{\text{уск. ср}} = \frac{v_{\text{ср}}}{a}, \quad (5)$$

где  $a$  — ускорения поезда, м/с<sup>2</sup>.

$$t_{\text{зам. ср}} = \frac{v_{\text{ср}}}{b}, \quad (6)$$

где  $b$  — замедление поезда, м/с<sup>2</sup>.

Приравниваем значение средней скорости к максимальной при неизменных значениях времени разгона и замедления поезда:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{общ}} - t_{\text{уск. ср}} - t_{\text{зам. ср}}. \quad (7)$$

Находим преодоленный путь в течение каждого отрезка времени по формулам (8) и (9):

$$S_{\text{уск. ср}} = \frac{a \cdot t_{\text{уск. ср}}^2}{2}. \quad (8)$$

$$S_{\text{зам. ср}} = \frac{b \cdot t_{\text{зам. ср}}^2}{2}. \quad (9)$$

Вычисляем расстояние, которое могло бы быть пройдено поездом в случае его движения со средней скоростью в качестве максимальной:

$$S_{\text{ср}} = v_{\text{ср}} \cdot t_{\text{ср}}. \quad (10)$$

Общая протяженность пути в таком случае может быть рассчитана по формуле (11):

$$S_{\text{расч}} = S_{\text{уск. ср}} + S_{\text{ср}} + S_{\text{зам. ср}}. \quad (11)$$

Находим коэффициент погрешности, представляющий собой отношение фактической максимальной скорости к средней. Определим его через коэффициент погрешности, приведенный в формуле (12):

$$K_{\text{погр}} = \left( 1 - \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} \right). \quad (12)$$

Далее определяем долю, найденной по формуле (12), коэффициента погрешности во временах разгона и замедления поездов по формулам (13, 14):

$$K_{\text{разг}} = \frac{\frac{K_{\text{погр}}}{2} \cdot b}{(a + b)}. \quad (13)$$

$$K_{\text{зам}} = \frac{K_{\text{погр}} \cdot a}{2(a+b)}. \quad (14)$$

Производим вычисление доли погрешности в расстоянии следования при разгоне, неизменной скорости и замедлении по формулам (15–17):

$$K_{\text{расст. разг}} = \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} + K_{\text{разг}}. \quad (15)$$

$$K_{\text{расст. пост}} = \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} - K_{\text{погр}}. \quad (16)$$

$$K_{\text{расст. зам}} = \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{общ}}} + K_{\text{зам}}. \quad (17)$$

где  $K_{\text{расст. разг}}$ ,  $K_{\text{расст. пост}}$ ,  $K_{\text{расст. зам}}$  — коэффициент погрешности расстояния следования соответственно разгона, постоянной скорости и замедления.

После того как рассчитаны все коэффициенты погрешности, по формулам (18–20) рассчитываем пройденные расстояния во время разгона, с постоянной скоростью и торможения. Суммарное значение полученных результатов должно быть идентичным расстоянию маршрута следования поезда.

$$S_{\text{разг}} = S_{\text{общ}} \cdot K_{\text{расст. разг}}. \quad (18)$$

$$S_{\text{ср}} = S_{\text{общ}} \cdot K_{\text{расст. пост}}. \quad (19)$$

$$S_{\text{зам}} = S_{\text{общ}} \cdot K_{\text{расст. зам}}. \quad (20)$$

По формуле (21) производим расчет ходовой скорости поезда в пути следования:

$$V_x = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{\text{разг}}}{a}}. \quad (21)$$

Производим замену в формуле расчета межпоездного интервала средней скорости полученным значением  $V_x$ :

$$I_{\text{р max}} = \frac{0,5 \cdot L_{\text{п2}} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{\text{п1}}}{V_x \cdot 16,7} + t_{\text{в}}. \quad (22)$$

С помощью данной формулы возможно рассчитывать значение наличной пропускной способности на железнодорожном полигоне, на котором применяется непараллельный график движения поездов. Вычисление наличной пропускной способности на участках, на которых поезд движется с ускорением или замедлением, выполняется отдельно.

Для определения межпоездного интервала между поездами в момент разгона производим интегрирование расчетной формулы по переменной в качестве скорости с ее изменением от значения, приближенного к нулю до максимальной скорости, которую достигает поезд в пути следования.

$$\begin{aligned} I_{\text{р разг(зам)}} &= \\ &= \int_0^{v_{\text{max}}} \left( \frac{0,5 \cdot L_{\text{п2}} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{\text{п1}}}{V_x \cdot 16,7} + t_{\text{в}} \right) dv = \\ &= 69,9 \cdot t_{\text{в}} + 0,20 \cdot L_{\text{п2}} + 0,39 \cdot L_{\text{бл1}} + \\ &+ 0,39 \cdot L_{\text{бл2}} + 0,20 \cdot L_{\text{п1}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Расчет выполняется отдельно для разгона и замедления в соответствии с формулой (23).

Обобщенная формула имеет вид (24):

$$I_{\text{р}} = \frac{I_{\text{р разг}}}{t_{\text{разг}}} + \frac{I_{\text{р max}}}{t_{\text{пост}}} + \frac{I_{\text{р зам}}}{t_{\text{зам}}}. \quad (24)$$

## Заключение

Представленная в работе методика расчета наличной пропускной способности, основанная на преобразовании существующих формул, повышает точность производимых вычислений. Она может найти наиболее широкое применение при расчете пропускной способности на железнодорожных линиях с непараллельным графиком движения поездов по причине наличия возмож-

ности в полном объеме учитывать при расчете времени на разгон и замедление следующих по железнодорожной линии поездов.

### Библиографический список

1. Абдуллаев Ж. Я. Особенности определения пропускной способности двухпутных участков / Ж. Я. Абдуллаев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Вып. 3.
2. Бобрик П. П. Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте / П. П. Бобрик // Технологии построения когнитивных транспортных систем: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — СПб., 2021.
3. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations / V. Čerić // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 1997. — Vol. 44. — Iss. 3. — Pp. 251–261.
4. Покровская О. Д. Логистические накопительно-распределительные центры как основа терминальной сети региона: монография / О. Д. Покровская. — Новосибирск, 2012. — 184 с.
5. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций / О. Д. Покровская // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 2(38). — С. 68–76.
6. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 80–94.
7. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.
8. Бессолицын А. С. Пригородные и местные поезда / А. С. Бессолицын // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом: сборник научных трудов. — 2013. — С. 3–22.
9. Котенко А. Г. Организация поездной работы на участках железной дороги учебного центра управления перевозками / А. Г. Котенко, А. П. Бадецкий, А. Б. Васильев. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. — 41 с.
10. Altazin E. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems / E. Altazin, S. Dauzère-Pérès, F. Ramond et al. // *European Journal of Operational Research*. — 2020. — Vol. 286. — Iss. 2. — Pp. 662–672.
11. Kianinejadshah A. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment / A. Kianinejadshah, S. Ricci // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 55. — Pp. 103–109.
12. Ljubaj I. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool / I. Ljubaj, M. Mikulčić, T. J. Mlinarić // *Transportation Research Procedia*. — 2020. — Vol. 44. — Pp. 137–144.
13. Zhang X. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration / X. Zhang, L. Nie // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2016. — Vol. 68. — Pp. 509–531.
14. Cheng C. H. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire / C. H. Cheng, C. L. Chow, W. K. Chow // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2021. — Vol. 108.
15. Bulíčka J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line / J. Bulíčka, P. Drdla, J. Matuška // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 53. — Pp. 106–113.
16. Högdahl J. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables / J. Högdahl, M. Bohlin, O. Fröidh // *Transportation Research. Part B: Methodological*. — 2019. — Vol. 126. — Pp. 192–212.
17. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.
18. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.

19. Pokrovskaya O. Assessment of Transport and Storage Systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — Vol. 1115. — Pp. 570–577.
20. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // *РЖД-Партнер*. — 2016.
21. Pokrovskaya O. Formation of logistics facilities in transport corridors / O. Pokrovskaya, S. Orekhov, N. Kapustina et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Ser. “VIII International Scientific Conference Transport of Siberia — 2020”. — 2020. — Vol. 8. — P. 012032.
22. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2022. — № 1. — С. 80–94.
23. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем / О. Д. Покровская // *Железнодорожный транспорт*. — 2019. — № 7. — С. 26–32.
24. Pokrovskaya O. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko, E. Khramtsova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. — INTERAGROMASH 2019. — 2019. — P. 012198.
25. Покровская О. Д. Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 175–190.
26. Дроздова М. А. Международные санкции как средства регулирования мировой экономики / М. А. Дроздова // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 113–116.
27. Дроздова М. А. Антиглобализм в контексте современного международного экономико-правового дискурса / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко // *Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева*. — 2020. — Т. 1. — № 3(96). — С. 247–253.
28. Дроздова М. А. Цифровая экономика и инфляция в период пандемии / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко, Д. А. Панков // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 11–14.
29. Дроздова М. А. Цифровизация отрасли железнодорожных перевозок: проблемы и успехи / М. А. Дроздова, Е. А. Фурсова // *III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов*. — 2021. — С. 119–121.
30. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // *Железнодорожный транспорт*. — 1998. — № 8.
31. Быкадоров С. А. Анализ методов определения себестоимости грузовых перевозок / С. А. Быкадоров, П. В. Куренков, А. В. Серкова и др. // *Вестник транспорта*. — 2014. — № 3. — С. 30–41.
32. Сафронова А. А. Формирование системы финансового менеджмента: теория, опыт, проблемы, перспективы: коллективная монография / А. А. Сафронова, Е. Н. Рудакова, П. В. Куренков и др. — М., 2018. — 228 с.
33. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // *Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник*. — 2004. — № 11. — С. 14.
34. Мохонько В. П. Проблемы создания ситуационно-аналитической системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // *Бюллетень транспортной информации*. — 2004. — № 9. — С. 22.
35. Куренков П. В. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок / П. В. Куренков, С. П. Вакуленко // *Экономика железных дорог*. — 2012. — № 12. — С. 96.
36. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 16 ноября 2010 г. № 128. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 305 с.
- Дата поступления: 20.12.2022  
Решение о публикации: 20.01.2023
- Контактная информация:**  
МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант кафедры;  
maks.marchenko1998@mail.ru

## Mathematical Model and Approach to Calculate Throughput

M. A. Marchenko

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

**For citation:** Marchenko M. A. Mathematical Model and Approach to Calculate Throughput // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 28–37. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-28-37

### Summary

**Purpose:** To propose methodology for calculating actual throughput on railway line with full consideration of racing and drag effect of trains along their way on resulting actual throughput. **Methods:** Methods of analytical review, simulation and dynamic modeling, mathematical modeling were applied. **Results:** Analytical transformations of well-known formula for calculating throughput were performed. Analytical formula has been obtained that allows calculating actual throughput with higher accuracy. **Practical significance:** The results of the study can be used in the dispatch centers of JSC “Russian Railways” transportation management for more complete analysis of the operation of the polygon of a road, railway lines or individual sections in order of more detailed analysis of work, performed on transportation.

**Keywords:** Railway polygon, throughput, inter-train interval, traffic non-parallel schedule, motion speed.

### References

1. Abdullaev Zh. Ya. Osobennosti opredeleniya propusknoy sposobnosti dvukhputnykh uchastkov [Features of determining the capacity of double-track sections]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, vol. 3. (In Russian)
2. Bobrik P. P. *Intellektualizatsiya upravleniya dvizheniem pri tranzite na transporte. Tekhnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Intelligentization of traffic control in transit on transport. Technologies for building cognitive transport systems: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. St. Petersburg, 2021. (In Russian)
3. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations. *Mathematics and Computers in Simulation*. 1997, vol. 44, Iss. 3, pp. 251–261.
4. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskie nakopitel'no-raspredelitel'nye tsentry kak osnova terminal'noy seti regiona: monografiya* [Logistics storage and distribution centers as the basis of the terminal network of the region: monograph]. Novosibirsk, 2012, 184 p. (In Russian)
5. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaya klassnost' zheleznodorozhnykh stantsiy [Logistic class of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2018, Iss. 2(38), pp. 68–76. (In Russian)
6. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. (In Russian)
7. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)
8. Bessolitsyn A. S. *Prigorodnye i mestnye poezda. Aktual'nye problemy upravleniya perevozhnym protsessom: sbornik nauchnykh trudov* [Suburban and local trains. Actual

problems of transportation process management: a collection of scientific papers]. 2013, pp. 3–22. (In Russian)

9. Kotenko A. G., Badetskiy A. P., Vasil'ev A. B. *Organizatsiya poezdnoy raboty na uchastkakh zheleznoy dorogi uchebnogo tsentra upravleniya perevozkami* [Organization of train work on sections of the railway of the transportation management training center]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, 41 p. (In Russian)

10. Altazin E., Dauzère-Pérès S., Ramond F. et al. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. *European Journal of Operational Research*. 2020, vol. 286, Iss. 2, pp. 662–672.

11. Kianinejadoshah A., Ricci S. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 55, pp. 103–109.

12. Ljubaj I., Mikulčić M., Mlinarić T. J. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 44, pp. 137–144.

13. Zhang X., Nie L. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, vol. 68, pp. 509–531.

14. Cheng C. H., Chow C. L., Chow W. K. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108.

15. Bulíčka J., Drdla P., Matuška J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 53, pp. 106–113.

16. Högdahl J., Bohlin M., Fröidh O. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables. *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2019, vol. 126, pp. 192–212.

17. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozk v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure for coal transportation in Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2015, Iss. 1(15), pp. 13–23. (In Russian)

18. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)

19. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of Transport and Storage Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 1115, pp. 570–577.

20. Pokrovskaya O. D. "Sbityy pritsel" klientoorientirovannosti ["Shot down sight" of customer orientation]. *RZhD-Partner* [RZD-Partner]. 2016. (In Russian)

21. Pokrovskaya O., Orekhov S., Kapustina N. et al. Formation of logistics facilities in transport corridors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "VIII International Scientific Conference Transport of Siberia 2020"*. 2020, vol. 8, p. 012032.

22. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. (In Russian)

23. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, Iss. 7, pp. 26–32. (In Russian)

24. Pokrovskaya O., Fedorenko R., Khramtsova E. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. INTERAGROMASH 2019*. 2019, p. 012198.

25. Pokrovskaya O. D., Titova T. S. Instrumentariy logisticheskogo normirovaniya dlya provedeniya audita transportno-skladskikh sistem [Logistics rationing tools for auditing transport and storage systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 175–190. (In Russian)

26. Drozdova M. A. *Mezhdunarodnye sanktsii kak sredstva regulirovaniya mirovoy ekonomiki. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov*



*III Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [International sanctions as a means of regulating the world economy. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference]. Federal'noe agentstvo zheleznodorozhnogo transporta, FGBOU VO PGUPS [Federal Agency for Railway Transport, FGBOU VO PGUPS]. 2020, pp. 113–116. (In Russian)

27. Drozdova M. A., Kravchenko L. A. Antiglobalizm v kontekste sovremennogo mezhdunarodnogo ekonomiko-pravovogo diskursa [Antiglobalism in the context of modern international economic and legal discourse]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva* [Bulletin of the Volga University. V. N. Tatishcheva]. 2020, vol. 1, Iss. 3(96), pp. 247–253. (In Russian)

28. Drozdova M. A., Kravchenko L. A., Pankov D. A. *Tsifrovaya ekonomika i inflyatsiya v period pandemii. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov III Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digital economy and inflation during a pandemic. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: a collection of proceedings of the III National Scientific and practical conference]. FGBOU VO PGUPS Publ., 2020, pp. 11–14. (In Russian)

29. Drozdova M. A., Fursova E. A. *Tsifrovizatsiya otrasli zheleznodorozhnykh perevozok: problemy i uspekhi. III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [Digitalization of the railway transportation industry: problems and successes. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings]. 2021, pp. 119–121. (In Russian)

30. Baritko A. L., Kurenkov P. V. Organizatsiya i tekhnologiya vneshnetorgovykh perevozok [Organization and technology of foreign trade transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1998, Iss. 8. (In Russian)

31. Bykadorov S. A., Kurenkov P. V., Serkova A. V. et al. Analiz metodov opredeleniya sebestoimosti gruzovykh perevozok [Analysis of methods for determining the cost of freight transportation]. *Vestnik transporta* [Transport Bulletin]. 2014, Iss. 3, pp. 30–41. (In Russian)

32. Safronova A. A., Rudakova E. N., Kurenkov P. V. et al. *Formirovanie sistemy finansovogo menedzhmenta: teoriya, opyt, problemy, perspektivy: kollektivnaya monografiya* [Formation of the financial management system: theory, experience, problems, prospects: collective monograph]. Moscow, 2018, 228 p. (In Russian)

33. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. *Situatsionnoe upravlenie perevozochnym protsessom* [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management: scientific information collection]. 2004, Iss. 11, pp. 14. (In Russian)

34. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Problemy sozdaniya situatsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte [Problems of creating a situational-analytical system for managing the transportation process in railway transport]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2004, Iss. 9, p. 22. (In Russian)

35. Kurenkov P. V., Vakulenko S. P. Finansovo-ekonomicheskoe reshenie problemy prigorodnykh perevozok [Financial and economic solution to the problem of suburban transportation]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Economics of Railways]. 2012, Iss. 12, p. 96. (In Russian)

36. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti. Utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 16 noyabrya 2010 g. № 128* [Instructions for calculating the available throughput. Approved. Order of Russian Railways OJSC dated November 16, 2010 № 128]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2011, 305 p. (In Russian)

Received: December 20, 2022

Accepted: January 20, 2023

#### Author's information:

Maxim A. MARCHENKO —

Postgraduate Student of the Department;

maks.marchenko1998@mail.ru

УДК629.014.6

## Анализ состояния и перспективы развития пассажирского железнодорожного транспорта для перевозки маломобильных групп населения

М. Г. Поярков<sup>1</sup>, О. С. Самошкин<sup>1</sup>, А. А. Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК»), Российская Федерация, 107078, Москва, ул. Маши Порываевой, 34

<sup>2</sup>АО Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), Российская Федерация, 170003, Тверь, Петербургское шоссе, д. 45-г

**Для цитирования:** Поярков М. Г., Самошкин О. С., Смирнов А. А. Анализ состояния и перспективы развития пассажирского железнодорожного транспорта для перевозки маломобильных групп населения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 38–51. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-38-51

### Аннотация

**Цель:** Обеспечение доступности для маломобильных групп населения объектов и услуг в сфере железнодорожного транспорта, что обеспечит их мобильность, а также возможности доступа к различным объектам и услугам (медицинским, образовательным, культурным и т. д.). **Методы:** Анализ и оценка требований законодательных, нормативных и отраслевых документов для обеспечения маломобильных групп населения равными с другими гражданами политическими, экономическими, гражданскими правами, предусмотренными Конституцией Российской Федерации. Обзор и анализ зарубежного опыта по использованию пассажирских вагонов для перевозки маломобильных групп населения. Совместная проработка вопроса ОАО «РЖД» с научными организациями ВНИИЖТ и ВНИИЖГ, а также с Всероссийским обществом инвалидов. **Результаты:** На основании проведенных технико-экономических исследований принято решение размещать специализированное купе для перевозки инвалида-колясочника в штабном вагоне. Для этого организована специальная зона с нетормозного конца штабного вагона, включающая в себя адаптированное купе, адаптированный туалет, широкий коридор и тамбур, оборудованный стационарным подъемным устройством для посадки/высадки инвалидов-колясочников. Обоснован минимально необходимый перечень оборудования для оснащения адаптированного купе и туалета. Все эти предложения вошли в техническое задание на новый штабной вагон с кузовом из нержавеющей стали. Проведен анализ востребованности штабных вагонов со специальной зоной для перевозки инвалидов-колясочников и объемы ежегодных перевозок за последний период. На основании анализа пассажирооборота маломобильных групп населения и оценки опыта европейских железных дорог рекомендовано провести работы по увеличению мест в штабных вагонах для пассажиров указанной категории. **Практическая значимость:** На основании проведенных исследований показана необходимость увеличения количества мест для пассажиров-колясочников с сопровождающими лицами. Показано, что эта задача может быть решена на базе штабных вагонов с кузовом из нержавеющей стали. Еще большая перспектива по увеличению мест для пассажиров-колясочников открывается в разрабатываемых новых вагонах («Партии 2023»), для которых будет использован габарит Т (увеличение ширины вагона от 3100 мм до 3400 мм) с продольным расположением спальных мест в купе.

**Ключевые слова:** Маломобильная группа населения, специализированная зона, штабной вагон, адаптированное купе, стационарный подъемник.

### Введение

Одной из целей государственной политики Российской Федерации является обеспечение инвалидам равных с другими гражданами возможно-

стей в реализации гражданских, экономических, политических и других прав и свобод, предусмотренных Конституцией Российской Федерации, а также ратифицированной в 2012 г. Российской

Федерацией Конвенции по правам инвалидов (Федеральный закон от 3 мая 2012 г. № 46-ФЗ).

По данным федеральной государственной информационной системы «Федеральный реестр инвалидов», общая численность инвалидов по состоянию на 1 июля 2022 г. составляет около 10,5 млн человек, в том числе:

- инвалиды I группы — 1,28 млн человек;
- инвалиды II группы — 4,65 млн человек;
- инвалиды III группы — 4,55 млн человек.

Кроме того, по экспертным оценкам, в России насчитывается порядка 40 млн граждан, отнесенных к маломобильным группам населения (около 27,4 % от общего количества населения России) (лица преклонного возраста (60 и более лет), временно нетрудоспособные лица, беременные женщины, люди с детскими колясками, дети дошкольного возраста и другие).

Обеспечение доступности для инвалидов объектов и услуг в сфере транспорта является одним из ключевых факторов в обеспечении их мобильности, а также возможности доступа к различным объектам и услугам, оказываемым в социуме (например, культурным, образовательным, медицинским).

ОАО «РЖД» проводит постоянную работу по обеспечению доступности для инвалидов объектов транспортной инфраструктуры, транспортных средств и предоставляемых транспортных услуг, которая была организована с 2016 г. на новом уровне.

За период с 2016 по 2021 г. удалось повысить основные показатели, характеризующие доступность для инвалидов железнодорожного транспорта, а именно:

- долю доступных для инвалидов железнодорожных вокзалов с 3 до 9 %, прирост на 2021 г. составил 1 %;
- долю поездов дальнего следования, включающих специализированные вагоны, предназначенные для перевозки пассажиров из числа инвалидов, с 45 до 92 %, прирост за год составил 4 %;

— долю вокзалов и остановочных пунктов, на которых обеспечивается сопровождение пассажиров из числа инвалидов, имеющих стойкие расстройства функции зрения и самостоятельного передвижения, и оказание им помощи, с 42 до 95 %, прирост за год составил 18 %. В настоящее время указанные услуги предоставляются на 10 тыс. объектах. Услугами сопровождения и оказания помощи в 2021 г. воспользовалось более 227 тыс. маломобильных пассажиров.

В 2021 г. инструктирование или обучение по вопросам, связанным с обслуживанием пассажиров из числа инвалидов, прошли около 64 тыс. работников (99,6 % работников железнодорожного транспорта, связанных с обслуживанием пассажиров из числа инвалидов).

#### **Анализ состояния пассажирского железнодорожного транспорта для перевозки маломобильных групп населения**

Для реализации процессов перевозки маломобильных групп населения ОАО «РЖД» провело большие исследования с научными организациями ВНИИЖТ, ВНИИЖГ и всероссийским обществом инвалидов (ВОИ). На основании технико-экономического анализа было принято решение размещать специализированное купе в штабном вагоне. Эта задача впервые была решена на штабном вагоне модели Р-8214, производства Тверского вагоностроительного завода (ТВЗ) в 1997 г. [1, 2].

Подобные решения по созданию отдельного купе, уширенного коридора со стороны нетормозного конца вагона и специализированного туалета, были использованы в конструкциях штабного вагона модели 61-4188 (Невский экспресс) и ряда других вагонов [3]. Особенностью штабных вагонов, построенных до 2008 г., является отсутствие подъемника в вагонах. В связи с этим для организации обеспечения посадки/высадки в поезда маломобильных пассажиров

были рассмотрены: кресло-коляска с электроприводом Airide S-preme PreviousNext и мобильные подъемники: PANDA STATION, VTPM mobile, Q-LIFT. Согласно техническим характеристикам, кресло-коляска позволяет осуществить доставку и подъем маломобильного пассажира до вагона поезда, но не обеспечивает возможность выгрузки в вагон. Для посадки (закатывания) в вагон маломобильного пассажира необходимо пересадить в другое кресло и воспользоваться мобильным подъемником. Однако, учитывая требования Федерального закона РФ от 1 декабря 2014 г. № 419 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам социальной защиты инвалидов в связи с ратификации конвенции о правах инвалидов», владелец инфраструктуры должен обеспечить возможность инвалиду-колясочнику не покидать свое кресло-коляску.

Учитывая, что применение кресел-колясок и мобильных подъемников создает значительные трудности для сотрудников вокзальных служб и проводников вагонов, может привести к срыву графика движения пассажирских поездов, руководством ОАО «РЖД» было принято решение оснащать все штабные вагоны с купе для перевозки маломобильных пассажиров стационарными подъемными устройствами. В связи с этим было разработано техническое задание на купейный штабной вагон с двумя стационарными подъемниками «по одному с каждой стороны», размещаемыми в тамбуре нетормозного конца вагона. Это вагон модели 61-4186, который выпускался ОАО «ТВЗ» значительными партиями до перехода на пассажирские вагоны из нержавеющей стали модельного ряда 61-4440 [4].

В вагоне модели 61-4186 тамбур нетормозного конца вагона имеет ширину 1430 мм (тормозной — 926 мм). Ширина входного дверного проема составляет 1000 мм вместо 785 мм стандартной ширины. Ширина входного дверного проема

из тамбура составляет 850 мм вместо 700 мм стандартного. Значительно увеличены размеры туалета: он имеет форму прямоугольной трапеции длиной 2440 мм и длиной тамбурной перегородки 928 мм, а купейной 1760 мм (стандартный туалет квадратный 1200 × 1050 мм). Ширина дверного проема туалета ≈ 1000 мм, а для купе ширина составляет ≈ 1100 мм. Ширина купе для инвалида на 100 мм больше стандартного для пассажиров. Такие размеры помещений и дверных проемов нетормозного конца вагона, предназначенного для размещения инвалида, позволяют беспрепятственно перемещаться и разворачиваться на креслах-каталках стандартизированных размеров [5].

Появление в составах пассажирских поездов дальнего следования штабных вагонов с купе для перевозки маломобильных граждан было положительно встречено общественностью. Эти вагоны строились серийно, и на первое ноября 2012 г. их было в приписном парке АО «ФПК» 442 шт. Как показал анализ спроса на такие услуги, количество вагонов для перевозки маломобильных граждан было необходимо увеличивать. Однако даже существующий на тот момент парк вагонов существенно помог в обеспечении массовых мероприятий с участием маломобильных граждан при проведении в России универсиады 2013 г. в Казани, Паралимпийских игр — 2014 в Сочи и ежегодных праздников в честь Дня Победы.

В настоящее время наиболее распространенным вагоном для перевозки маломобильных групп населения является штабной вагон модели 61-4445. Этот вагон относится к модельному ряду 61-4440 с обшивкой кузова из нержавеющей стали увеличенной длины [6]. На рис. 1 и 2 показаны планировки концевых частей штабных вагонов моделей 61-4186 и 61-4445.

В табл. 1 приведены параметры помещений для перевозки маломобильных групп населения

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные параметры штабных вагонов, оборудованных помещениями для перевозки маломобильных групп населения

| Наименование параметров                        | Размерность    | Модели вагонов |                   |
|------------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------|
|                                                |                | 61-4186        | 61-4445           |
| Длина вагона по осям сцепления автосцепок      | мм             | 24537 ± 20     | 25500 ± 20 (+963) |
| База вагона                                    | мм             | 17 000         | 17 000            |
| Масса тары (без экипировки), не более          | т              | 57,8           | 60,0 (+2,2)       |
| Ширина тамбура нетормозного конца вагона       | мм             | 1429           | 1516 (+87)        |
| Ширина тамбура тормозного конца вагона         | мм             | 926            | 1034 (+108)       |
| Ширина входной двери нетормозного конца вагона | мм             | 1000           | 1150 (+150)       |
| Ширина входной двери тормозного конца вагона   | мм             | 784            | 994 (+109)        |
| Площадь купе для инвалида                      | м <sup>2</sup> | 3,67           | 4,09              |
| Площадь стандартного купе                      | м <sup>2</sup> | 3,64           | 3,66              |
| Площадь туалета для инвалида                   | м <sup>2</sup> | 3,27           | 3,46              |
| Площадь стандартного туалета                   | м <sup>2</sup> | 1,26           | 1,62              |

в штабных вагонах. Как видно из табл. 1, ОАО «РЖД» в лице Федеральной пассажирской дирекции уделяет большое внимание улучшению комфорта для указанных групп населения [7].

### Разработка требований к помещениям для обслуживания маломобильных групп населения перспективных пассажирских вагонов

В АО «ФПК» был проведен анализ замечаний и предложений по улучшению комфорта перевозки маломобильных групп населения в пассажирских вагонах дальнего следования. Было отмечено, что наибольший комфорт обеспечивают штабные вагоны, которые с нетормозного конца оборудованы специальными зонами, приспособленными для посадки/высадки и пребывания пассажиров в кресле-коляске [8].

Указанная зона включает в себя адаптированное купе, адаптированный туалет, широкий коридор и подъемное устройство в тамбуре со стороны адаптированного купе «некотловой конец вагона».

Адаптированное купе оборудовано:

- нижним специальным спальным местом (диваном);
- верхним спальным местом;
- полками для мелких вещей под верхним спальным местом со встроенными индивидуальными светильниками;
- багажной нишей;
- подоконным столом;
- сиденьем;
- местом для размещения кресла-коляски с устройствами, препятствующими самопроизвольному перемещению заторможенной коляски или ее опрокидыванию при разгоне и торможении вагона;
- крючками для одежды;
- лестницей для пользования багажной нишей и размещения на верхнем спальном месте;
- поручнями для перемещения пассажира с ограниченными возможностями;
- информационным табло.

В свою очередь, адаптированный туалет оборудован:



- унитазом (вакуумным туалетом) с возможностью ручного слива;
- откидным поручнем около окна;
- стационарным поручнем около окна;
- умывальником с обеспечением возможности подъезда к нему пассажира на кресле-коляске;
- зеркалами, установленными с учетом пользования ими пассажиром на кресле-коляске.

Кроме того, купе оборудовано системой речевого информирования для слабовидящих пассажиров. В купе установлено светодиодное табло, отражающее следующую информацию:

- индикация «занят/свободен» для адаптивного туалета;
- температура внутри вагона;
- текущее время.

Табло по запросу пассажира или сопровождающего его лица выдает звуковую информацию (на внешний громкоговоритель) этих параметров. В случае аварийной ситуации табло выдает световой и звуковой сигнал «Авария». Зона, доступная пассажиру с ограниченными возможностями, оснащена табличками с использованием азбуки Луи Брайля (пиктограммы около кнопки вызова проводника и около розетки 220 В).

Однако наращивание парка за счет приобретения штабных вагонов, оборудованных зонами для перемещения пассажира в кресле-коляске, приводит к возрастанию убытков для АО «ФПК». Так, серийно выпускаемый ОАО «ТВЗ» штабной вагон имеет всего 26 спальных мест (из них 2 места для инвалида и сопровождающего его лица) вместо 36 спальных мест в серийном купейном вагоне. Во вновь разработанных двухэтажных пассажирских вагонах снижение количества спальных мест за счет оборудования вагона одним купе и туалетом для инвалида, а также необходимостью их размещения на среднем уровне еще более существенно. Штабной вагон имеет всего 50 спальных мест, а купейный вагон со спальными местами 64.

Таким образом, использование штабных вагонов, оборудованных купе для инвалида, приводит к существенным расходам в сфере перевозок пассажиров и требует экономического обоснования уровня тарифов.

В связи с этим была проведена работа по изучению возможности проезда в стандартных купе штабных вагонов групп пассажиров с ограниченными физическими возможностями и обеспечению доступности для пассажиров с ограниченными физическими возможностями III категории в пассажирских вагонах всех типов, находящихся в эксплуатации.

Для решения указанных задач по запросу АО «ФПК» специалистами ОАО «ТВЗ» произведена проверка возможности размещения пассажиров с ограниченными возможностями в салоне серийно изготавливаемых обычных купе вагонов различных типов (плацкартный, купейный, вагон с местами для сидения). Оценка производилась на основе вписывания кресла-коляски, соответствующего требованиям пункта 4 [5]. По результатам работ получено подтверждение данной возможности в целом, но выявлены определенные сложности, наиболее проблемным местом является въезд и выезд из пассажирского салона плацкартного вагона за счет выступа элементов продольного спального места в проход. Решение данного вопроса возможно путем демонтажа двух крайних нижних продольных спальных мест. Это приведет к сокращению количества посадочных мест в плацкартных вагонах, обеспечивающих перевозки наиболее социально незащищенных слоев населения.

Вторым вариантов возможного решения вопроса является частичное изменение размеров мягких элементов вышеуказанных спальных мест в сторону их уменьшения. Для реализации данного варианта необходима корректировка размеров, регламентируемых санитарными правилами [9].

Для обеспечения III категории доступности для пассажиров с ограниченными физическими



возможностями в пассажирских вагонах всех типов, находящихся в эксплуатации, проводятся мероприятия дирекцией железнодорожных вокзалов и центральной дирекцией пассажирских перевозок по приобретению подъемников, обеспечивающих посадку инвалида-колясочника в вагон поезда и т. д.

При этом вагонные кресла-коляски будут храниться непосредственно в вагоне, а собственная кресло-коляска пассажира на время пути передается на хранение в почтово-багажный вагон поезда.

Для обучения персонала ведутся работы по включению тем по обслуживанию пассажиров с особыми потребностями во все программы подготовки проводников, переподготовки проводников и повышения их квалификации. В настоящее время корпоративным кадровым учебно-методическим центром АО «ФПК» выполнена работа по обеспечению включения вопросов, связанных с обслуживанием пассажиров с ограниченными возможностями, во все применяемые программы.

Наиболее важным направлением является проведение работ по увеличению мест для проезда пассажиров с ограниченными физическими возможностями во вновь проектируемых вагонах.

В АО «ФПК» было проведено совещание с участием представителей ФГУП «ВНИИЖГ», ОАО «ТВЗ» и специалистов причастных подразделений ОАО «РЖД» по данному вопросу. Было предложено несколько планировочных решений пассажирского вагона для перевозки групп инвалидов-колясочников:

- на основе серийного штабного вагона с купе и туалетом для инвалидов и применением для перемещения пассажиров данной категории транспортной тележки, являющейся принадлежностью вагона;

- новая планировка с увеличением ширины коридора и возможностью заезда транспортной тележки в купе за счет сокращения ширины купе;

- с продольным расположением специализированного спального места для ЛОФВ в купе.

Наиболее перспективным специалисты ФГУП «ВНИИЖГ» посчитали вариант с продольным расположением спальных мест в купе, но для его реализации необходимо провести научные исследования предлагаемого решения с обоснованием возможности указанных изменений и внесением соответствующих корректировок в санитарные правила.

Работы по пассажирским вагонам с продольным расположением спальных мест и расширенным центральным проходом проводились специалистами ЗАО НО «ТИВ» и ОАО «ТВЗ». Изготовленный демонстрационный натурный макет части вагона показал перспективность таких планировок с точки зрения снижения затрат на перевозку одного пассажира [10].

Для оценки предложенных вариантов увеличения количества мест для перевозки маломобильных групп населения рассмотрим вагоны специального назначения пассажирских поездов европейских стран.

### **Анализ конструкций пассажирских вагонов европейских стран, предназначенных для перевозки маломобильных групп населения**

В соответствии с Конвенцией ООН о правах инвалидов в большинстве стран Европы такие группы пассажиров именуются лицами с ограниченными физическими возможностями (ЛОФВ) [11].

В Российской Федерации эксплуатируется два вида поездов, которые имеют выход на европейские железные дороги колеи 1435 мм.

В связи с тем, что в 2012 г. средний возраст пассажирских вагонов для международных сообщений составил более 28 лет (производства WBA в ГДР), было принято решение о разработке вагонов нового поколения габарита RIC совместного

производства ОАО «ТВЗ» и компании SIEMENS AG (ФРГ).

Вагон пассажирский спальный для международного сообщения габарита RIC модели 61-4476 изготовлен в соответствии с ТУ 3183-050-05744544 и комплектом конструкторской документации 4476.00.00.000 и A2V00001937697 [12].

Вагон предназначен для международного сообщения в областях Международного железнодорожного союза — UIC (ширина колеи — 1435 мм) и в европейской части Российской Федерации, странах СНГ и в странах Балтийских государств (ширина колеи 1520 мм) на электрифицированных участках железных дорог.

Переход между железнодорожными сетями с различной шириной колеи осуществляется посредством замены тележек с применением имеющихся устройств инфраструктуры на установках для смены колеи (пункта переподкатки).

Для колеи 1520 мм вагон оснащается безлюлечными тележками с дисковым тормозом моделей 61-4108 и 61-4109 с конструкционной скоростью 160 км/ч.

Для колеи 1435 мм вагон оснащается тележками модели SF300R/3SMG с конструкционной скоростью 200 км/ч.

Для сцепки тележки с кузовом вагона при смене тележек используется мультисцепка. Одна ее часть расположена на раме вагона в зоне шкворня, а вторая на наддрессорной балке тележки.

Вагон имеет 8 спальных купе с 4 спальными местами (вместо трехместного с трехъярусным расположением полок), одно служебное купе, одно помещение для отдыха проводника, также он оборудован двумя экологически чистыми туалетными модулями, один из которых со встроенным душем.

На вагоне габарита RIC, так же как и на двухэтажных вагонах, используются межвагонные переходы фирмы HUBNER GMBH, обеспечивающие безопасный и комфортабельный переход

пассажирам и обслуживающего персонала из вагона в вагон.

Кроме того, вагон оснащен регулируемой по высоте переходной площадкой для обеспечения возможности использования отечественной автосцепки СА-3.

Вагон оборудован системой кондиционирования, в которой в качестве хладагента применяется озонобезопасный хладагент R 134a.

Основные тонические характеристики и размеры вагона модели 61-4476 приведены в работе [6].

В международных составах, сформированных из вагонов модели 61-4476, не были предусмотрены места для ЛОФВ. В связи с этим для перевозки ЛОФВ по техническому заданию АО «ФПК» совместно с АО «Вагонреммаш» был разработан проект и проведена модернизация 6 вагонов модели 61-4476 для перевозки ЛОФВ.

Основными дополнительными требованиями к новым вагонам являются:

- наличие двух специализированных купе для проезда ЛОФВ и сопровождающих лиц;
- обеспечение ЛОФВ доступа в вагон с применением коляски (подъемник для посадки/высадки пассажиров);
- одинаковый уровень всех полов и отсутствие уклонов в специализированной зоне для проезда ЛОФВ;
- адаптированный для ЛОФВ туалет;
- наличие информационных указателей, пиктограмм и тактильной информации;
- применение контрастной окраски, подсветки кнопок и указателей;
- наличие дисплеев.

На рис. 3 показана планировка указанного модифицированного вагона модели 61-4476.

Вторым примером обновления пассажирского состава для международных перевозок, проводимого АО «ФПК», является организация сообщения на участках Москва — Берлин, Москва — Нижний Новгород с использованием

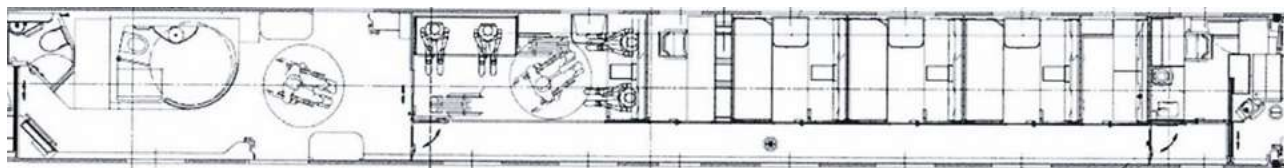


Рис. 3. Проект планировки вагона модели 61-4476 габарита RIC для перевозки лиц с ограниченными физическими возможностями

поездов сочлененного вида компании Talgo (Испания).

Компания Talgo известна своими достижениями в производстве пассажирских вагонов с системой автоматического изменения ширины колеи, позволяющей минимизировать затраты на время технической операции по изменению ширины колеи и системы принудительного наклона кузова при прохождении кривых, позволяющей повысить скорости движения вагона в кривых участках пути на 30–60 км/ч без снижения уровня комфорта для пассажиров и обслуживающего персонала.

Для реализации проекта было закуплено 7 поездов сочлененного типа. Комплектация поездов и их пассажировместимость на маршрутах Москва — Берлин, Москва — Нижний Новгород различна и приведена в табл. 2 [6].

Подвижной состав типа А предназначен для колеи 1520 и 1435 мм, и его вагоны оборудованы

системой автоматического измерения ширины колеи. Каждый состав типа А или Б состоит из 20 вагонов. При этом головной и хвостовой вагоны с одной стороны устанавливаются на отдельную тележку, а с другой стороны на тележку, которая является общей и для следующего вагона.

Тележки вагонов оборудованы двумя колесными блоками с независимым вращением колес. Тормозная система оснащается дисковыми тормозами и противоюзным устройством, рессорное подвешивание одноступенчатое на пневморессорах.

В качестве тяговых единиц на железных дорогах России использовался новый отечественный электровоз ЭП-20 со скоростью движения до 200 км/ч.

Срок службы металлоконструкций кузовов вагонов Talgo составляет 40 лет. В табл. 3 приведены основные параметры вагонов.

В каждом составе с изменяемой шириной колеи типа А располагаются два вагона с купе для проезда ЛОФВ, организованных в спальнях

ТАБЛИЦА 2. Комплектация и пассажировместимость поездов Москва — Берлин (тип А) и Москва — Нижний Новгород (тип Б)

| Тип вагона                                                    | Количество вагонов в поезде |       | Пассажировместимость                                            |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------|
|                                                               | Тип А                       | Тип Б |                                                                 |
| А (технический вагон с дизель-генератором)                    | 2                           | 2     | 1 служебное купе                                                |
| В (вагон с местами для сидения I класса)                      | 2                           | 2     | 20                                                              |
| С (вагон с местами для сидения II класса)                     | —                           | 9     | 36                                                              |
| Д (вагон-буфет)                                               | 1                           | 1     | 11 посадочных мест                                              |
| Е (вагон-ресторан)                                            | 1                           | 1     | 30 посадочных мест                                              |
| Ф (вагон спальный II класса)                                  | 5                           | -     | 18 (4 купе по 4 места и 1 купе на 2 места)                      |
| Г (вагон спальный I класса)                                   | 4                           | -     | 12 (6 купе по 2 места)                                          |
| Н (вагон спальный I класса с санузелом и душем в каждом купе) | 3                           | 3     | 10 (5 купе по 2 человека)                                       |
| И (вагон спальный I класса с купе для инвалида)               | 2                           | 2     | 6 (2 купе по 2 человека и 1 купе для инвалида с сопровождающим) |

ТАБЛИЦА 3. Основные параметры вагонов Talgo

|                                                                          |                  |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Конструкционная скорость                                                 | 200 км/ч         |
| Габарит                                                                  | 03-ВМ            |
| Максимальная нагрузка на ось                                             | 18 тс            |
| Длина поезда по осям автосцепки                                          | 263,70 м         |
| Длина поезда между буферами                                              | 263,30 м         |
| Длина кузова по осям автосцепок:<br>тип А;<br>тип В, С, D, E, F, G, H, I | 12,2 м<br>13,3 м |
| Ширина кузова вагона                                                     | 2942 мм          |
| Высота вагона от УВГ                                                     | 3375 мм          |
| Вес поезда (брутто)                                                      | 378 т            |
| Общее количество мест:<br>состав типа А;<br>состав типа Б                | 224<br>410       |
| Проход по сопряжению прямой с кривой                                     | $R - 120$ м      |
| Проход по S-образной кривой без прямой вставки                           | $R - 170$ м      |

вагонах первого класса. На рис. 4 приведена планировка такого вагона.

Вагон для проезда ЛОФВ оборудован:

- специализированным купе для проезда ЛОФВ и сопровождающего;
- подъемником для посадки/высадки пассажира-колясочника;
- туалетом, адаптированным для использования ЛОФВ;
- информационными указателями, пиктограммами и тактильной информацией;
- визуальными дисплеями для глухонемых пассажиров.

Кроме того, применены контрастная окраска, подсветка кнопок и указатели для слабовидящих пассажиров.

### Перспективы развития вагонов локомотивной тяги для перевозки маломобильных групп населения

Как видно из вышесказанного, АО «ФПК» длительное время проводит работы по поиску технических решений конструкции пассажирского подвижного состава для перевозки маломобильных граждан. Эта работа приводит к дополнительным затратам АО «ФПК», но является необходимой исходя из государственной политики Российской Федерации в реализации положений, предусмотренных Конституцией Российской Федерации.

По данным АО «ФПК» на 1 июля 2022 г., на сети эксплуатируется 883 пассажирских вагонов дальнего следования, оборудованных купе для маломобильных пассажиров. Как сообщил пресс-центр ОАО «РЖД», услугами таких вагонов воспользовались: 2018 г. — 163,7 тыс. пассажиров, а в 2019 г. — 235 тыс. пассажиров.

Таким образом, перевозка ЛОФВ востребована на железных дорогах РФ и требует оптимизации затрат на эту сферу услуг. Оптимизация затрат необходима и для других видов деятельности АО «ФПК» [13].

В связи с этим АО «ФПК» с 2016 г. начало внедрять прогрессивные нормы обслуживания поездов. Основной принцип — обслуживание составов поездов меньшей численностью проводников при обеспечении постоянного контроля проводниками за системами безопасности обслуживаемых групп вагонов и соблюдении требова-

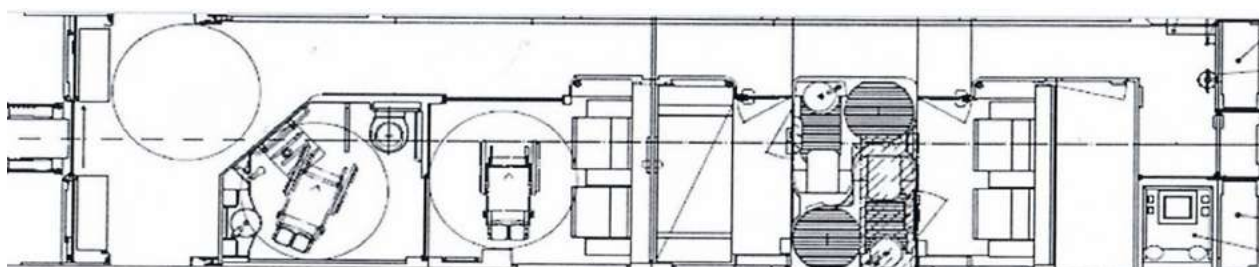


Рис. 4. Планировка вагона 1-го класса с купе для лиц с ограниченными физическими возможностями

ний трудового законодательства в части графика труда и отдыха работников. При этом с учетом индивидуальной технологии обслуживания поезда предусматривается передача функций по поддержанию санитарного состояния в вагонах и очистке подвагонного оборудования от снега и льда от проводников работникам аутсорсинговых компаний.

Учитывая положительный эффект от применения прогрессивных норм обслуживания пассажирских поездов, на совещании у генерального директора АО «ФПК» было принято решение о разработке и изготовлении новых вагонов, специально предназначенных для малолюдных технологий. Это дало начало проекту вагонов модельного ряда «2019».

В соответствии с принятым решением АО «ФПК» сформулированы технические требования, на основании которых ОП ООО «ТМХ Инжиниринг» разработало и согласовало со всеми заинтересованными службами ОА «РЖД» техническое задание на вагон моделей 61-4516 (плацкартный), 61-4517 (купейный) и 61-4529 (служебный).

Вагоны моделей 61-4516 и 61-4517 работают в сцепе из двух вагонов разного исполнения. Вагон модели 61-4529 в сцепке не включается и входит в состав автономно.

Сцеп состоит из двух плацкартных вагонов или двух купейных вагонов, соединенных тормозными концами между собой. Вагоны каждой модели изготавливаются в двух вариантах — один вариант с сервисными помещениями, а другой со служебным отделением и купе проводников. Место отдыха проводников сцепа расположено в вагоне со служебным помещением.

Вагоны моделей 61-4517 и 61-4516 по своему оснащению системами жизнеобеспечения, металлоконструкции кузова и планировке пассажирских купе или пассажирских помещений весьма близки к наиболее известным серийным

вагонам моделей 61-4440 (купейный) и 61-4447 (некупейный). Особенности их конструкции и основные параметры приведены в работе [14].

В вагоне модели 61-4529 впервые в отечественной практике реализованы предложения АО «ФПК» по увеличению количества перевозимых ЛОФВ [15].

## Заключение

1. В рамках программы «Доступная среда» ОАО «РЖД» проводит постоянную работу по обеспечению доступности для ЛОФВ объектов транспортной инфраструктуры, транспортных средств и предоставляемых транспортных услуг.

2. Для реализации процесса перевозки ЛОФВ АО «ФПК» провело большие исследования совместно с научными организациями ВНИИЖТ, ВНИИЖГ и Всероссийским обществом инвалидов (ВОИ) по выбору типа вагонов и способа размещения ЛОФВ на пассажирском подвижном составе. На основании технико-экономического анализа было принято решение размещать инвалидов-колясочников в специализированной зоне нетормозного конца штабного вагона.

3. Производство штабных вагонов с купе для размещения инвалидов-колясочников началось на ОАО «ТВЗ» в 1997 г. и продолжается по настоящее время. По данным АО «ФПК» на 1 июля 2020 г., по сети эксплуатируется 883 вагона. За 2019 г. они перевезли 235 тыс. пассажиров. Все эти вагоны имеют по одному купе для инвалида колясочника и сопровождающего лица.

4. АО «ФПК» на основании анализа замечаний и предложений как со стороны пассажиров, так и обслуживающего персонала, были разработаны технические требования к специализированной зоне нетормозного конца вагона, включающей в себя адаптированные купе, туалет, часть коридора и увеличенный тамбур. Разработанные требования включаются в обязательном порядке в технические задания на штабные вагоны новых моделей.

5. Актуальной задачей для дальнейшего расширения перевозки ЛОФВ на магистральных путях является увеличение количества мест в одном составе. В настоящее время эта работа проводится для пассажирских вагонов нового модельного ряда и вагонов в габарите Т.

### Библиографический список

1. Ермишкин И. С. В новый век — в новом вагоне / И. С. Ермишкин // Тяжелое машиностроение. — 1998. — № 8. — С. 30–33.

2. Корнев Ю. В. Обеспечение доступности инфраструктуры и пассажирского парка качественными услугами для пассажиров с ограниченными физическими возможностями / Ю. В. Корнев, В. С. Покровский, О. С. Самошкин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сборник тезисов VIII Международной научной-технической конференции. — СПб.: ПГУПС, 2013. — С. 48–51.

3. ТУ 3183-015-05744544—99. Вагон пассажирский купейный штабной модели 61-4188. — Тверь: ОАО «ТВЗ», 2000. — 67 с.

4. ТУ 3183-014-05744544—1999. Вагон пассажирский купейный штабной модели 61-4186. — Тверь: ОАО «ТВЗ», 1999. — 75 с.

5. ГОСТ Р 52286—2004. Кресла-каталки транспортные реабилитационные. Основные параметры. Технические требования. — М.: Стандартинформ, 2005. — 46 с.

6. Бобрышев К. В. Перспективный пассажирский подвижной состав / К. В. Бобрышев, Ю. В. Корнев, В. С. Покровский и др. // Железнодорожный транспорт. — 2015. — № 7. — С. 43–45.

7. ТУ 3183-029-05744544—2008. Вагон пассажирский купейный штабной модели 61-4445. — Тверь: ОАО «ТВЗ», 2008. — 86 с.

8. Корнев Ю. В. Обеспечение пассажиров с ограниченными физическими возможностями качественными услугами на железнодорожном транспорте / Ю. В. Корнев, В. С. Покровский, О. С. Самошкин // Вагонный парк. — 2014. — № 4. — С. 38–40.

9. СП 2.5.1198—03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте, утвержденные главным государственным

санитарным врачом Российской Федерации — первым заместителем Министерства здравоохранения РФ Г. Г. Онищенко 3 марта 2003 г.

10. Кравцов Г. А. Тенденции пассажирского вагоностроения / Г. А. Кравцов, С. Л. Самошкин, В. М. Бабиев и др. // Железнодорожный транспорт. — 1989. — № 8. — С. 43–45.

11. Аксенов В. А. О подходе к организации доступной среды для маломобильных пассажиров в поездах международного сообщения / В. А. Аксенов, О. С. Самошкин, О. С. Юдаев и др. // Наука и техника транспорта. — 2015. — № 3. — С. 13–16.

12. ТУ 3183-050-05744544—2012. Вагон пассажирский спальный для международных сообщений типа RIC модели 61-4447. — Тверь: ОАО «ТВЗ», 2012. — 61 с.

13. Стратегия развития АО «ФПК» до 2030 г. и основные приоритеты его развития до 2015 г. — М.: АО «ФПК», 2012. — 54 с.

14. Поярков М. Г. Двухвагонный сцеп пассажирских вагонов: технические решения и уровень комфорта пассажиров / М. Г. Поярков, О. С. Самошкин // Вагоны и вагонное хозяйство. — 2022. — № 1(69). — С. 35–38.

15. ГОСТ 33190—2019. Вагоны пассажирские локомотивной тяги и моторвагонный подвижной состав. Технические требования для перевозки инвалидов и методы контроля. — М.: Стандартинформ, 2020. — 40 с.

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 13.02.2023

### Контактная информация:

ПОЯРКОВ Михаил Геннадьевич — заместитель

Генерального директора, главный инженер;

PoyarkovMG@fpc.org.rzd

САМОШКИН Олег Сергеевич — канд. техн. наук,

начальник отдела развития научно-технических и инновационных продуктов, корпоративной системы менеджмента качества и бережливого производства; SamoshkinOS@fpc.ru

СМИРНОВ Александр Андреевич — инженер

I категории, отдел кузовов и компонентов железнодорожной техники, группа стендовых прочностных испытаний вагонов; smirnov.a@tiv.ru

## Analysis of the State and Horizon Development of Railway Passenger Transport for Population Groups with Reduced Mobility

M. G. Poyarkov<sup>1</sup>, O. S. Samoshkin<sup>1</sup>, A. A. Smirnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “Federal Passenger Company” (JSC “FPC”), 34 Mashy Poryvayevoy str., Moscow, 107078, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC Scientific Organization “Tver Institute of Car Building” (JSC NO “TIV”), 45-g, Peterburgskoe highway, Tver, 170003, Russian Federation

**For citation:** Poyarkov M. G., Samoshkin O. S., Smirnov A. A. Analysis of the State and Horizon Development of Railway Passenger Transport for Population Groups with Reduced Mobility // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 38–51. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-38-51

### Summary

**Purpose:** To ensure the accessibility for population groups with reduced mobility of facilities and services in the sphere of railway transport that will provide for their mobility as well as the possibility to access various objects and services (medical, educational, cultural, etc.) **Methods:** Analysis and evaluation of the requirements of legislative, regulatory and industrial technical documents to provide reduced mobility population groups with equal with other citizens rights on Russian Federation Constitution. Review and analysis of international practices and different use cases of passenger rail cars to transport reduced mobility population groups. Joint study of the subject by JSC “Russian Railways” with scientific organizations of All-Russian Scientific Institute of Railway Transport and Institute of Hygiene on Railway Transport as well as with All-Russian Society of Disabled People. **Results:** Based on the results of technical and economical studies, decision was made to place specialized compartment for wheelchair users in a staff car. For this purpose, specialized area from unbraked end of a staff car has been organized which includes adapted compartment, adapted toilet, wide corridor and entrance zone equipped with stationary lift for boarding/detrainment of wheelchair users. Minimally necessary list of equipment to tool up adapted compartment and toilet is grounded. All these proposals were included into Technical Task on a new staff car with a body from stainless steel. Analysis of demand for staff cars with specialized area for wheelchair user transportation and annual traffic volume over the last period have been carried out. Based on the analysis of reduced mobility passenger turnover and the assessment of European railways practices, it is recommended to pursue works on increase the seating capacity in staff cars for passengers of pointed category. **Practical importance:** Based on the conducted research, the necessity to increase the seating capacity for wheelchair users with accompanying persons has been shown. It has been demonstrated that this issue can be solved using staff cars with stainless steel bodies. Even greater prospect for increasing seating capacity for wheelchair users opens up for new cars (Class “2023”) which are being developed in accordance with “T” overall dimensions (car width increase from 3100 to 3400 mm) and lengthwise arrangement of sleeping places in compartment.

**Keywords:** Passengers with reduced mobility, specialized area, staff car (specialized car for bed linen storage, accommodation of train master, law-enforcement officers, people with reduced mobility and accompanying personnel), easily accessible (adapted) compartment, stationary lift.

### References

1. Ermishkin I. S. V novyy vek — v novom vagone [In the new century — in a new car]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering]. 1998, Iss. 8, pp. 30–33. (In Russian)
2. Kornev Yu. V., Pokrovskiy V. S., Samoshkin O. S. *Obespechenie dostupnosti infrastruktury i passazhirskogo*

*parka kachestvennymi uslugami dlya passazhirov s ograniченными физическими возможностями. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: sbornik tezisev VIII Mezhdunarodnoy nauchnoy-tekhnicheskoy konferentsii* [Ensuring the availability of infrastructure and the passenger fleet with quality services for passengers with disabilities.



Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: collection of abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2013, pp. 48–51. (In Russian)

3. TU 3183-015-05744544—99. *Vagon passazhirskiy kupeynyy shtabnoy modeli 61-4188* [TU 3183-015-05744544—99. Headquarter passenger compartment car model 61-4188]. Tver': OAO "TVZ" Publ., 2000, 67 p. (In Russian)

4. TU 3183-014-05744544—1999. *Vagon passazhirskiy kupeynyy shtabnoy modeli 61-4186* [TU 3183-014-05744544—1999. Headquarter passenger compartment car model 61-4186]. Tver': OAO "TVZ" Publ., 1999, 75 p. (In Russian)

5. GOST R 52286—2004. *Kresla-katalki transportnye reabilitatsionnye. Osnovnye parametry. Tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 52286—2004. Wheelchairs transport rehabilitation. Main parameters. Technical requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2005, 46 p. (In Russian)

6. Bobryshev K. V., Kornev Yu. V., Pokrovskiy V. S. et al. Perspektivnyy passazhirskiy podvizhnoy sostav [Promising passenger rolling stock]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2015, Iss. 7, pp. 43–45.

7. TU 3183-029-05744544—2008. *Vagon passazhirskiy kupeynyy shtabnoy modeli 61-4445* [TU 3183-029-05744544—2008. Headquarter passenger compartment car model 61-4445]. Tver': OAO "TVZ" Publ., 2008, 86 p. (In Russian)

8. Kornev Yu. V., Pokrovskiy V. S., Samoshkin O. S. Obespechenie passazhirov s ogranichennymi fizicheskimi vozmozhnostyami kachestvennymi uslugami na zheleznodorozhnom transporte [Providing passengers with disabilities with quality services in railway transport]. *Vagonnyy park* [Car park]. 2014, Iss. 4, pp. 38–40. (In Russian)

9. SP 2.5.1198—03. *Sanitarnye pravila po organizatsii passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte, utverzhdennye glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Rossiyskoy Federatsii — pervym zamestitelem Ministerstva zdravookhraneniya RF G. G. Onishchenko 3 marta 2003 g.* [SP 2.5.1198—03. Sanitary rules for the organization of passenger transportation on railway transport, approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation — First Deputy of the Ministry of Health of the Russian Federation G. G. Onishchenko on March 3, 2003]. (In Russian)

10. Kravtsov G. A., Samoshkin S. L., Babiev V. M. et al. Tendentsii passazhirskogo vagonostroeniya [Trends in passenger car building]. *Zheleznodorozhnyy transport*

[Zheleznodorozhny transport]. 1989, Iss. 8, pp. 43–45. (In Russian)

11. Aksenov V. A., Samoshkin O. S., Yudaev O. S. et al. O podkhode k organizatsii dostupnoy sredy dlya malomobil'nykh passazhirov v poezdakh mezhdunarodnogo soobshcheniya [On the approach to organizing an accessible environment for passengers with limited mobility in international trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Nauka i tekhnika transporta]. 2015, Iss. 3, pp. 13–16. (In Russian)

12. TU 3183-050-05744544—2012. *Vagon passazhirskiy spal'nyy dlya mezhdunarodnykh soobshcheniy tipa RIC modeli 61-4447* [TU 3183-050-05744544—2012. Passenger sleeping car for international traffic of the RIC type, model 61-4447]. Tver': OAO "TVZ" Publ., 2012, 61 p. (In Russian)

13. *Strategiya razvitiya AO "FPK" do 2030 g. i osnovnye priority ego razvitiya do 2015 g.* [Development Strategy of JSC FPC until 2030 and the main priorities for its development until 2015]. Moscow: AO "FPK" Publ., 2012, 54 p. (In Russian)

14. Poyarkov M. G., Samoshkin O. S. Dvukhvagonnyy step passazhirskikh vagonov: tekhnicheskie resheniya i uroven' komforta passazhirov [Two-car coupler of passenger cars: technical solutions and passenger comfort level]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo* [Wagons and wagon economy]. 2022, Iss. 1(69), pp. 35–38. (In Russian)

15. GOST 33190—2019. *Vagony passazhirskie lokomotivnoy tyagi i motorvagonnyy podvizhnoy sostav. Tekhnicheskie trebovaniya dlya perevozki invalidov i metody kontrolya* [GOST 33190—2019. Passenger carriages of locomotive traction and multiple unit rolling stock. Technical requirements for the transportation of disabled people and methods of control]. Moscow: Standartinform Publ., 2020, 40 p. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 13, 2023

#### Author's information:

Mikhail G. POYARKOV — Deputy General Director, Chief Engineer; PoyarkovMG@fpc.org.rzd

Oleg S. SAMOSHKIN — PhD in Engineering, Head of the Department of Development of Scientific, Technical and Innovative Products, Corporate Quality Management System and Lean Manufacturing; SamoshkinOS@fpc.ru

Alexander A. SMIRNOV — Engineer of the I Category, Department of Bodies and Components of Railway Equipment, Group of Bench Strength Tests of Wagons; smirnov.a@tiv.ru

УДК 629.421.083

## Моделирование процессов тепловой диагностики тепловозной выпрямительной установки

В. А. Кручек, П. В. Дворкин

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

**Для цитирования:** Кручек В. А., Дворкин П. В. Моделирование процессов тепловой диагностики тепловозной выпрямительной установки // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 52–59. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-52-59

### Аннотация

**Цель:** Проанализировать возможность определения неисправности локомотивной выпрямительной установки с помощью определения тепловых полей и измерения температуры диодов. **Методы:** Применялись анализ неисправностей выпрямительных установок и их составляющих за определенный промежуток времени, моделирование и тепловой расчет в пакете программ Solid works. **Результаты:** Получена картина изменения тепловых полей и температуры при диагностике исправно работающей тепловозной выпрямительной установки, а также при неисправностях диодов, таких как пробой и обрыв. **Практическая значимость:** Показана возможность контроля технического состояния тепловозной выпрямительной установки при определении тепловых полей диодов, а также определения неисправностей по изменению температуры диода.

**Ключевые слова:** Выпрямительная установка, моделирование теплового состояния, нагрев диодов, тепловая диагностика, диагностика состояния диодов, неисправность диода.

### Введение

В настоящее время распространены методы диагностики, которые требуют большого количества ресурсов. В крайних случаях необходимо демонтировать выпрямительную установку с тепловоза, чтобы проверить все ее элементы, что возможно только при текущем ремонте тепловоза.

С целью сокращения времени ремонта неисправных элементов необходимо внедрить новые виды диагностики. В данной статье будет рассмотрена тепловая диагностика выпрямительной установки с помощью пирометра. Данный метод дает возможность выявить неисправность на ранней стадии, что позволит устранить ее до того, как выпрямительная установка выйдет из строя. Также этот метод может выявить ослабле-

ние затяжки болтовых соединений, из-за которых у силовых вентилях уменьшается срок службы. Тепловую диагностику возможно будет проводить чаще, чем остальные виды диагностик, так как она занимает значительно меньше времени.

При работе выпрямительной установки с помощью пирометра возможно будет увидеть тепловую картину, позволяющую определить неисправность и своевременно устранить ее или заменить вышедшие из строя элементы. Изменения, которые происходят с течением времени в любом выпрямительном устройстве и приводят к потере его работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым он подвергается. Например, электрическое воздействие, которое передается по всем узлам выпрямителя в процессе работы и проявляется в виде

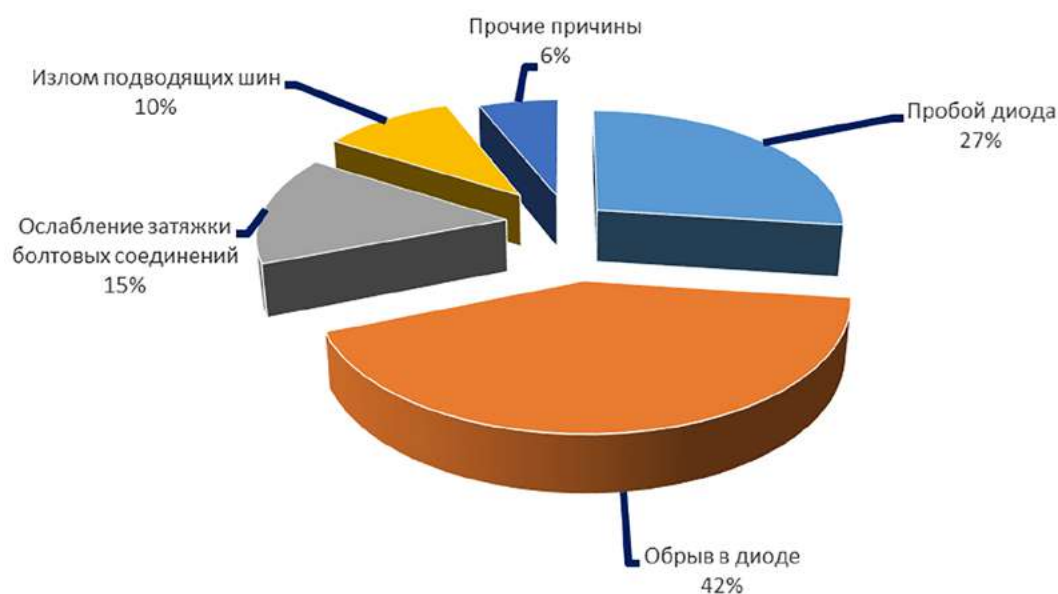


Рис. 1. Статистика отказов выпрямительной установки

статических и динамических нагрузок; механическое воздействие проявляется при различных колебаниях тепловоза, что приводит к механическим разрушениям отдельных его элементов; тепловое воздействие влияет на элементы выпрямителя, особенно в тяжелых режимах работы, изменяя характеристики его элементов; химическое воздействие вызывает коррозию элементов выпрямителя с последующим их разрушением; электромагнитное воздействие оказывает влияние на работу электронного оборудования. Статистика отказов выпрямительной установки представлена на рис. 1.

Диагностика электрооборудования локомотивов (электровозов и тепловозов) осуществляется применительно к трансформаторам тока и напряжения, выпрямительной установке, реверсивным переключателям, поездным контакторам, силовым проводам, шинам и их соединениям, шунтам ослабления поля ТЭД, шунту амперметра. Наибольший интерес из перечисленных элементов представляет выпрямительная установка. По тепловому состоянию элементов выпрямитель-

ной установки возможно сделать заключение о ее техническом состоянии. Так, в случае превышения допустимого тока, протекающего по диоду или тиристор, в них будут возникать повышенные температуры, которые возможно зафиксировать средствами технической диагностики. При этом следует отметить, что на всех тепловозах с выпрямительной установкой существует защита от превышения максимального тока генератора, который является и током выпрямительной установки [1, 2]. Превышение максимального тока в цепи одного тягового электродвигателя не приведет к превышению допустимого тока диодов. Поэтому превышение допустимого тока диода возможно только при неисправности выпрямительной установки. Браковочные критерии при изменении температуры выпрямительной установки представлены в табл. 1 [3].

Уровень дефекта:

- а) 0 — норма;
- б) 1 — предупреждение, требующее последующего наблюдения;
- в) 2 — неисправность, требующая вмешательства.

ТАБЛИЦА 1. Браковочные критерии температурных аномалий выпрямительной установки

| Узел                                           | Уровень дефекта | Превышение температуры относительно окружающей среды, °С | Максимальная разность температур ближайших элементов, °С |
|------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Элементы одного шкафа выпрямительной установки | 0               | Менее 50                                                 | 5                                                        |
|                                                | 1               | 50–80                                                    | 5–15                                                     |
|                                                | 2               | Свыше 80                                                 | Свыше 15                                                 |

Для выбора уровня дефекта выбирают худший вариант. При этом нижний уровень имеет хорошо запоминающееся значение, что позволяет слесарю проводить качественный анализ в процессе диагностики.

### 1. Расчет ребристого радиатора с принудительной конвекцией

Наиболее распространенный и эффективный способ охлаждения выпрямительной установки — принудительная конвекция за счет обдува вентилятором. В процессе принудительного охлаждения роль теплового излучения сводится к минимуму, из-за того что на его долю приходится около 3 % отводимого тепла. Для того чтобы улучшилось качество обдува, возможно применить один или несколько методов: увеличение скорости вращения крыльчатки вентилятора, увеличение количества вентиляторов, увеличение количества лопастей, установка вентиляторов большего диаметра, а также изменение их формы. Такой вид теплообмена, когда внутренняя энергия подается струями или потоками, называется конвекцией. При вынужденной (принудительной) конвекции перемещение вещества обусловлено действием внешних сил (насос, лопасти вентилятора и т. д.). Ее применяют, когда естественная конвекция является малоэффективной. Для моделирования параметров нагрева и получения тепловых картин неисправностей выпрямительной установки проводился расчет параметров конвекции по стандартным методикам [4].

Число Рейнольдса определяет характер потока: ламинарный, промежуточный или турбулентный [5, 6]:

- а) ламинарный, если  $Re < 2300$ ;
- б) промежуточный, если  $2300 < Re < 4000$ ;
- в) турбулентный, если  $4000 < Re$ .

Число Нуссельта — один из основных критериев подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и интенсивностью теплообмена за счет теплопроводности (в условиях неподвижной среды).

Для моделирования нагрева элементов выпрямительной установки необходимо рассчитать конвекцию, так как этот режим соответствует принудительному обдуву воздухом. Для этого потребуются характеристики вентилятора выпрямительной установки и физические параметры воздуха, которые представлены в табл. 2, 3.

Скорость потока воздуха, м/с:

$$V = \frac{P}{3600 \cdot F} = \frac{5040}{3600 \cdot 0,104} = 13,46 \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $P$  — производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/ч;  
 $F$  — площадь охлаждаемой поверхности, м<sup>2</sup>.

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{13,46 \cdot 0,08}{16,96 \cdot 10^{-6}} = 61320,75, \quad (2)$$

где  $L$  — размер радиатора вдоль ребра, м;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} =$$

$$= 0,021 \cdot 6762,17 \cdot 0,86 = 122,12, \quad (3)$$

где  $Pr$  — число Прандтля.

Коэффициент конвективного теплообмена ребер радиатора, Вт / (м<sup>2</sup> · К):

$$\alpha_k = Nu \cdot \frac{\lambda_v}{L} = \frac{122,12 \cdot 0,0276}{0,08} = 42 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4)$$

где  $\lambda_v$  — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт / (м · К).

Сборка элемента выпрямительной установки состоит из диода ВЛ-200 и ребристого охладителя. Диод припаян к массивному медному основанию. Основание является токоведущим элементом цепи вентиля и служит для отвода тепла, которое выделяется в элементе при прохождении электрического тока

ТАБЛИЦА 2. Характеристики вентилятора

| Параметр                                          | Значение      |
|---------------------------------------------------|---------------|
| Тип вентилятора                                   | центробежный  |
| Диаметр колеса вентилятора, мм                    | 364           |
| Привод                                            | электрический |
| Мощность электродвигателя, кВт                    | 6             |
| Производительность вентилятора, м <sup>3</sup> /ч | 5040          |

ТАБЛИЦА 3. Физические параметры сухого воздуха

| Температура воздуха, $t_v, ^\circ\text{C}$ | Коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2 / \text{с}$ | Теплопроводность воздуха, $\lambda_v \cdot 10^2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ | Число Прандтля, $Pr$ |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 10                                         | 14,16                                                                                | 1,51                                                                                    | 0,705                |
| 20                                         | 15,06                                                                                | 2,59                                                                                    | 0,703                |
| 30                                         | 16,00                                                                                | 2,67                                                                                    | 0,70                 |
| 40                                         | 16,96                                                                                | 2,76                                                                                    | 0,699                |
| 50                                         | 17,95                                                                                | 2,83                                                                                    | 0,697                |
| 60                                         | 18,97                                                                                | 2,90                                                                                    | 0,696                |
| 70                                         | 20,02                                                                                | 2,96                                                                                    | 0,694                |
| 80                                         | 21,09                                                                                | 3,05                                                                                    | 0,692                |

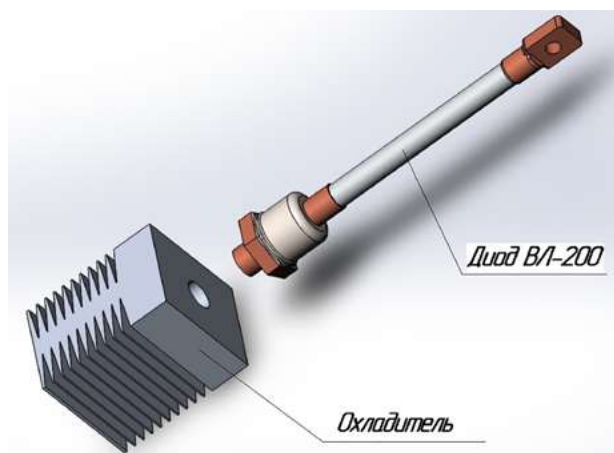


Рис. 2. Сборка диода с охладителем

К верхнему электроду элемента припаяна гибкая вставка из медного кабеля, которая выходит наружу сквозь изоляционную втулку, укрепленную в верхней части стального корпуса. Для расчета тепловая энергия, выделяемая диодом, рассеивается посредством конвекции. Коэффициент конвективной теплопередачи равен 42 Вт / (м<sup>2</sup> · К), а температура окружающей среды температура равна 40 °С.

При протекании тока по вентилю возникают повышенные температуры, и для эффективного охлаждения используются специальные охладители, представленные на рис. 2. [7]. Как правило, такие охладители изготавливают из алюминия или алюминиевых сплавов (силумина). Вентиль вставляется в охладитель, в котором для улучшения теплоотвода имеются перпенди-

кулярно расположенные ребра. Для уменьшения электрического и теплового сопротивления все контактирующие поверхности должны иметь плотный контакт (плотное примыкание частей, что учитывается при моделировании в пакете программ Solid works установкой соответствующих сопряжений). При завинчивании вентиля в охладитель для снижения механических усилий на выпрямительном элементе необходимо применять специальные гаечные ключи с нормированным крутящим моментом.

Результаты тепловых расчетов диода выпрямительной установки в сборе с охладителем приведены в следующей главе.

## 2. Моделирование неисправностей тепловозной выпрямительной установки

Для моделирования нагрева выпрямительной установки используется приложение Solid Works Simulation (имеющий набор стандартных инструментов по заданию параметров теплообмена и сопротивлений). Расчет производился с учетом методик, представленных в научных публикациях [8–10] (выбор граничных условий и сопротивлений).

ТАБЛИЦА 4. Параметры сетки при моделировании

| Параметр               | Значение                                  |
|------------------------|-------------------------------------------|
| Имя исследования       | Нагрев диода                              |
| Тип сетки              | Сетка на твердом теле (стандартная сетка) |
| Используемое разбиение | Сетка на основе кривизны                  |
| Качество сетки         | Высокая                                   |

ТАБЛИЦА 5. Сравнение результатов моделирования

| Элемент     | Состояние элемента | Температура °C |              |
|-------------|--------------------|----------------|--------------|
|             |                    | Минимальная    | Максимальная |
| Диод ВЛ 200 | Исправное          | 50             | 67           |
|             | Пробой             | 50             | 75           |
|             | Обрыв              | 50             | 67           |
| Охла-дитель | Исправное          | 20             | 50           |
|             | Пробой             | 20             | 50           |
|             | Обрыв              | 20             | 50           |

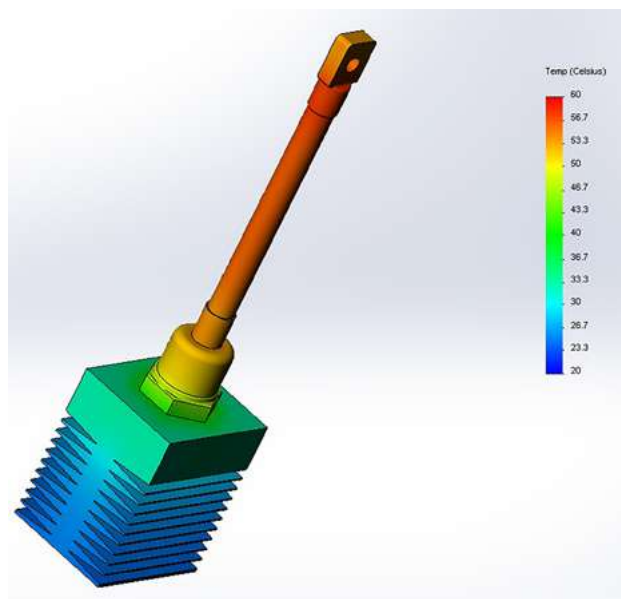


Рис. 3. Модель нагрева одного диода

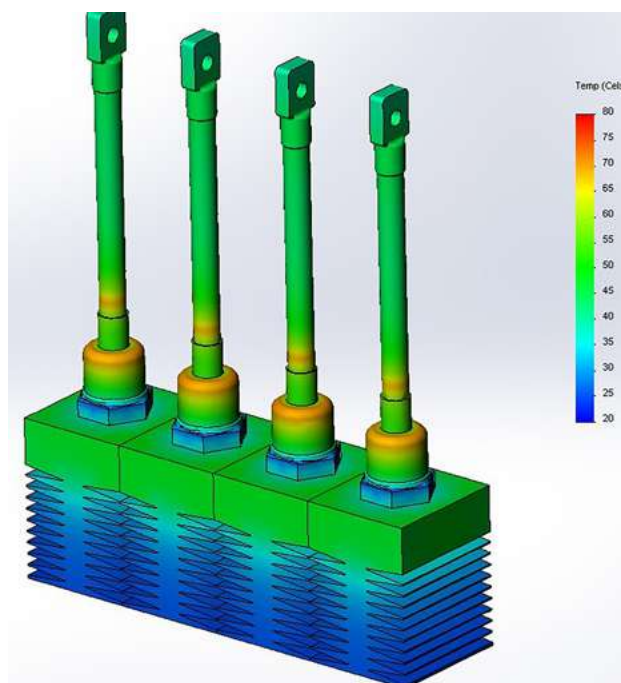


Рис. 4. Нагрев при исправном режиме работы

При построении сетки используются параметры, представленные в табл. 4.

Данные параметры выбраны исходя из наличия малоразмерных элементов — отверстия, фаски, скругления.



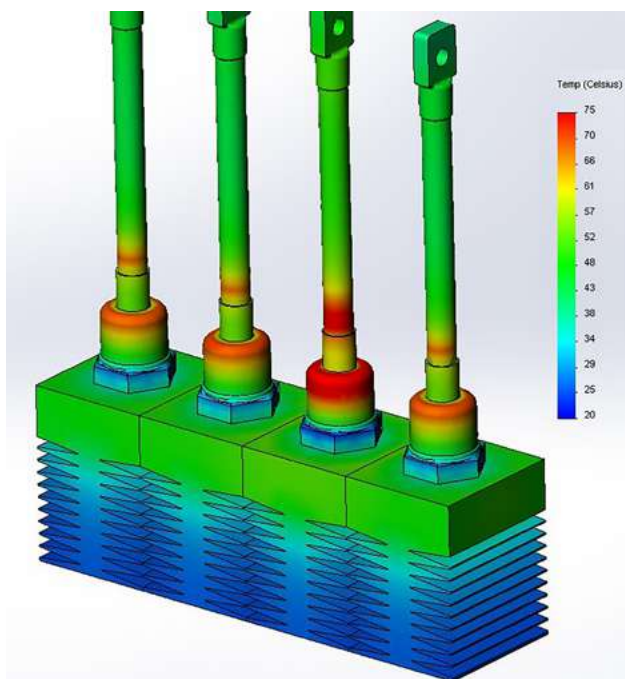


Рис. 5. Нагрев при пробое одного диода

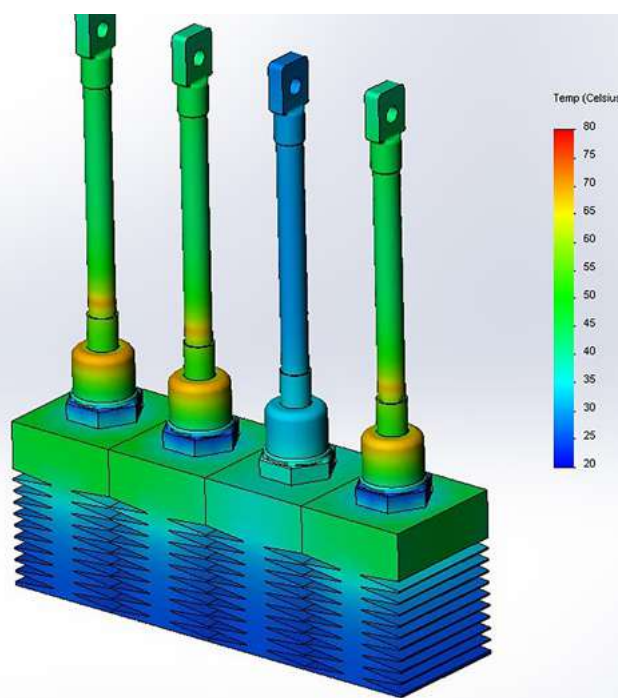


Рис. 6. Нагрев при обрыве одного диода

Значения для исследования подбираем из эксплуатационных показателей выпрямительной установки УВКТ-5. Начальная температура переходного процесса принимается 40 °С. Условия конвенции задаются исходя из параметров, полученных при расчете формул (1) – (3). Результаты теплового расчета диода ВЛ-200 в Solidworks представлены на рис. 3.

Исследования на четырех диодах, для определения разницы по нагреву элементов при разных режимах работы диода, представлены на рис. 4–6.

Сравнение результатов исследований приведено в табл. 5. Моделирование разных режимов работы выпрямительной установки в SolidWorks показало, что с помощью тепловой картины можно найти неисправный элемент.

## Заключение

Моделирование работы выпрямительной установки показало, что по тепловой картине, которую будет отображать пирометр, возможно определить неисправность. В зависимости от нее нагрев отдельных элементов выпрямительной установки

будет разной, что позволит своевременно устранить неисправность выпрямительной установки. Контроль технического состояния выпрямительной установки и своевременный ремонт, в рамках современной системы технического обслуживания и ремонта, позволят повысить надежность работы тепловоза в целом и уменьшить количество внеплановых ремонтов. Предложенные тепловые картины можно использовать в перспективных системах ремонта, в рамках предложенной ОАО «РЖД» концепции современного ремонта.

## Библиографический список

1. Бабков Ю. В. Автоматизация локомотивов / Ю. В. Бабков, Ф. Ю. Базилевский, А. В. Грищенко. — Учеб.-метод. центр по образованию на ж. д. транспорте, 2007. — 323 с.
2. Курилкин Д. Н. Электрические передачи локомотивов: учебное пособие / Д. Н. Курилкин. — СПб.: ПГУПС, 2020. — Ч. 1. — 66 с.
3. Ровдо А. А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами: справочник / А. А. Ровдо. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 287 с.



4. Грищенко А. В. Повышение эффективности охлаждения силовых полупроводниковых приборов / А. В. Грищенко, И. Г. Киселев, А. С. Корнев и др. // Электротехника. — 2016. — № 5. — С. 32–36.
5. Киселев И. Г. Математическое моделирование контактного теплообмена в полупроводниковых преобразовательных установках железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, Д. В. Крылов // Известия ПГУПС. — 2012. — № 1. — С. 66–71.
6. Киселев И. Г. Метод диагностирования исправности охладителей ДТС, применяемых в преобразовательных установках железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, Д. В. Крылов // Элтранс-2011: материалы шестого Международного симпозиума. — СПб., 2013. — С. 424–428.
7. Сергеев П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев. — М.: Энергия, 1969. — 632 с.
8. Степанов С. И. Методика расчета теплового состояния силового полупроводникового прибора с охладителем / С. И. Степанов, А. Б. Буянов // Совершенствование систем охлаждения мощных полупроводниковых преобразователей железнодорожного транспорта: сб. науч. тр. ЛИИЖТа. — Л., 1988. — С. 105–116.
9. Киселев И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог / И. Г. Киселев. — М., 2007. — 277 с.
10. Михальчук Н. Л. Энергетическая эффективность полупроводниковых преобразователей локомотивов / Н. Л. Михальчук, Д. Н. Курилкин, С. В. Урушев и др. // Электротехника. — 2018. — № 10. — С. 15–20.
- Дата поступления: 12.01.2023  
Решение о публикации: 03.02.2023
- Контактная информация:**  
КРУЧЕК Виктор Александрович — д-р техн. наук, профессор; victor.kruchek@yandex.ru  
ДВОРКИН Павел Вадимович — канд. техн. наук; pvdvorkin@yandex.ru

## Modeling the Processes of Thermal Diagnostics of Diesel Locomotive Rectifier

V. A. Kruchek, P. V. Dvorkin

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

**For citation:** Kruchek V. A., Dvorkin P. V. Modeling the Processes of Thermal Diagnostics of Diesel Locomotive Rectifier // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 52–59. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-5 88X-2023-1-52-59

### Summary

**Purpose:** To analyze the possibility of determining locomotive rectifier unit malfunction with the help of thermal fields and diode temperature measurement. **Methods:** There were applied the analysis of rectifier unit faults and their components for a certain period, modeling and thermal calculation in Solid Works Software Package. **Results:** The picture of thermal field and temperature changes at the diagnosis of regularly running diesel rectifier unit as well as at diode faults such as a breakdown and break. **Practical significance:** The possibility of monitoring the technical condition of a diesel locomotive rectifier unit when determining diode thermal fields as well as of determining possible malfunctions by diode temperature change is shown.

**Keywords:** Rectifier, thermal state simulation, diode heating, thermal diagnostics, diode state diagnostics, diode malfunction.

## References

1. Babkov Yu. V., Bazilevskiy F. Yu., Grishchenko A. V. *Avtomatizatsiya lokomotivov* [Locomotive automation]. Moscow: GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zhelezнодорожном транспорте" Publ., 2007. 323 p. (In Russian)
2. Kurilkin D. N. *Elektricheskiye peredachi lokomotivov: uchebnoye posobiye* [Electric transmissions of locomotives]. St. Petersburg: Saint-Petersburg State transport university Publ., 2020. 66 p. (In Russian)
3. Rovdo A. A. *Poluprovodnikovye diody i skhemy s diodami: spravochnik* [Semiconductor diodes and circuits with diodes: a reference book]. Moscow: DMK Press Publ., 2006. 287 p. (In Russian)
4. Grishchenko A. V., Kiselev I. G., Kornev A. S. et al. Povyshenie effektivnosti okhlazhdeniya silovykh poluprovodnikovyykh priborov [Improving the cooling efficiency of power semiconductor devices]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2016, Iss. 5, pp. 32–36. (In Russian)
5. Kiselov I. G., Krylov D. V. Matematicheskoye modelirovaniye kontaktnogo teploobmena v poluprovodnikovyykh preobrazovatel'nykh ustanovkakh zhelezнодорожного транспорта [Mathematical modeling of contact heat transfer in semiconductor converters of railway transport]. *Izvestiya PGUPS* [Izvestiya PGUPS]. 2012, pp. 66–71. (In Russian)
6. Kiselev I. G., Krylov D. V. *Metod diagnostirovaniya ispravnosti okhladiteley DTS, primenyayemykh v preobrazovatel'nykh ustanovkakh zhelezнодорожного транспорта. Eltrans-2011: materialy shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma* [A method for diagnosing the health of diesel engine coolers used in converting installations of railway transport. Eltrans-2011: Proceedings of the 6th International Symposium]. St. Petersburg, 2013, pp. 424–428. (In Russian)
7. Sergeev P. S. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow: Energiya Publ., 1969. 632 p. (In Russian)
8. Stepanov S. I., Buyanov A. B. *Metodika rascheta teplovogo sostoyaniya silovogo poluprovodnikovogo pribora s okhladitelem. Sovershenstvovanie sistem okhlazhdeniya moshchnyykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley zhelezнодорожного транспорта: sb. nauch. tr. LIIZhTA* [The method of calculating the thermal state of a power semiconductor device with a cooler. scientific tr. LIIZhTA]. L., 1988, pp. 105–116. (In Russian)
9. Kiselov I. G. *Teplotekhnika na podvizhnom sostave zheleznykh dorog* [Heating technology on rolling stock of railways]. Moscow, 2007. 277 p. (In Russian)
10. Mikhal'chuk N. L., Kurilkin D. N., Urushev S. V. et al. Energeticheskaya effektivnost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley lokomotivov [Energy efficiency of semiconductor converters for locomotives]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2018, pp. 15–20. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 03, 2023

### Author's information:

Viktor A. KRUCHEK — Dr. Sci. in Engineering,

Professor; victor.kruchek@yandex.ru

Pavel V. DVORKIN — PhD in Engineering;

pvdvorkin@yandex.ru

УДК 620.191.3:629.46-2

## Исследование циклической трещиностойкости стали литых несущих деталей грузовых вагонов

Д. В. Даниленко<sup>1</sup>, В. П. Ефимов<sup>2</sup>, В. А. Чернов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «УК РМ РЕЙЛ», Российская Федерация, 430006, Саранск, ул. Лодыгина, 11

<sup>2</sup>ООО «УИЦ — Вагоны», Российская Федерация, 622007, Нижний Тагил, ул. Орджоникидзе, д. 22, кв. 28

<sup>3</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Даниленко Д. В., Ефимов В. П., Чернов В. А. Исследование циклической трещиностойкости стали литых несущих деталей грузовых вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 60–69. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-60-69

### Аннотация

**Цель:** Проведение комплексных экспериментальных исследований циклической трещиностойкости литой стали, которая применяется для несущих деталей ходовых систем грузовых вагонов, с построением кинетической диаграммы усталостного разрушения. **Методы:** Применен метод механических испытаний образцов литой стали в условиях циклического нагружения, который позволяет получить количественные оценки способности материала сопротивляться усталостному разрушению на стадии развития усталостной трещины (испытания на циклическую трещиностойкость). Для исследования поверхности усталостного разрушения применен микрографический анализ рельефа. Для исследования элементного состава литой стали и механизмов развития усталостных трещин применен микрорентгеноспектральный анализ на различных стадиях усталостного разрушения. **Результаты:** Приведены результаты исследований циклической трещиностойкости литой стали 20ГЛ, которая применяется для несущих деталей грузовых вагонов. Построена кинетическая диаграмма усталостного разрушения, проведен детальный микрографический анализ поверхности усталостного разрушения и исследования элементного состава неметаллических включений. **Практическая значимость:** По результатам исследований можно проводить оценку работоспособности стали 20ГЛ с трещиной и прогнозировать живучесть. Полученные результаты позволяют совершенствовать методы ресурсного проектирования литых несущих деталей ходовых систем грузовых вагонов с целью повышения их эксплуатационной надежности. Результаты исследований используются предприятиями — изготовителями литых деталей для контроля стабильности технологии и повышения качества продукции.

**Ключевые слова:** Циклическая трещиностойкость, литые несущие детали, тележка грузового вагона, живучесть, микрорентгеноспектральный анализ литой стали, скорость роста усталостной трещины.

Литые несущие детали грузовых железнодорожных вагонов, изготавливаемые из стали 20ГЛ, по ГОСТ 32400—2013 [1], работают при высокой нагруженности и в различных климатических условиях. Такие детали, как боковая рама, надрессорная балка, корпус автосцепки и другие, должны обладать комплексом свойств, обеспе-

чивающих регламентированные значения сопротивления усталости и хрупкому разрушению металла, из которых они изготовлены, на протяжении назначенного срока службы. Вопросы повышения надежности литых несущих деталей грузовых вагонов становятся все более актуальными в связи с развитием в РФ тяжеловесного

движения [2] и внедрением инновационных вагонов [3]. Необходимы более углубленные исследования усталостной прочности и живучести, ответственных за безопасность движения деталей. Для литых несущих деталей новых конструкций тележек разрабатываются новые требования к их надежности [4] и новые расчетные методы их ресурсного проектирования с учетом зон повышенной ответственности [5].

Экспериментальные исследования усталостной живучести литых сталей и натуральных деталей проводятся различными организациями [6–8]. На базе этих исследований создан и постоянно пополняется банк данных по характеристикам сопротивления развитию усталостных трещин литых сталей. Однако проблема повышения усталостной прочности и живучести литых несущих деталей грузовых тележек становится все более актуальной в связи с разработкой и запуском в эксплуатацию инновационных тележек с нагрузкой на ось 25–27 тс [9, 10] и значительным повышением требований к их эксплуатационной надежности.

Известно, что процесс усталостного разрушения подразделяется на две основные стадии: стадию зарождения и стадию распространения усталостной трещины. Способность материала конструкции эффективно сопротивляться развитию трещины является одним из важнейших факторов, определяющим живучесть конструкции. Наличие конструктивных концентраторов, структурных дефектов литой стали, различного типа включений, реализация сложного напряженного состояния в локальных зонах конструкции деталей способствуют более раннему зарождению трещин усталости и, соответственно, ускоренному разрушению материала литых несущих деталей.

Механические испытания образцов в условиях циклического нагружения позволяют получить количественные оценки способности материала сопротивляться усталостному разрушению на

стадии распространения усталостной трещины (испытания на циклическую трещиностойкость). Основным показателем, наглядно иллюстрирующим эту способность, является кинетическая диаграмма усталостного разрушения.

Цель испытаний на циклическую трещиностойкость образцов из стали 20ГЛ — построение кинетической диаграммы усталостного разрушения. В качестве материала для исследования использовали сталь 20ГЛ, из которой изготавливаются боковые рамы тележек грузовых вагонов. Циклические испытания проводили на универсальной сервогидравлической машине фирмы «Инстрон» при комнатной температуре в условиях знакоположительного циклического растяжения с частотой изменения нагрузки  $f = 10\text{--}20$  Гц. Коэффициент асимметрии цикла нагрузки составлял  $R = 0,1$ . Испытания проводили на прямоугольных образцах с односторонним надрезом (образцы на внецентренное растяжение «ВР») (рис. 1). Габаритные размеры образцов:  $62,5 \times 60 \times 25$  мм. Методика проведения испытаний на циклическую трещиностойкость соответствовала требованиям методических рекомендаций РД 50-345—82 [11]. Анализ развития усталостной трещины (УТ) в образце данного типа и с данным вариантом надреза показал, что траектория роста УТ незначительно отклоняется от условия перпендикулярности по отношению к линии действия внешней циклической нагрузки (рис. 2). В диапазоне экспериментально полученных значений скоростей роста трещины  $\Delta v \approx 6 \cdot 10^{-8} \text{—} 1,5 \cdot 10^{-6}$  м/цикл развитие УТ характеризуется формированием все время возрастающей в размерах по мере увеличения длины трещины локальной пластической зоны в ее вершине.

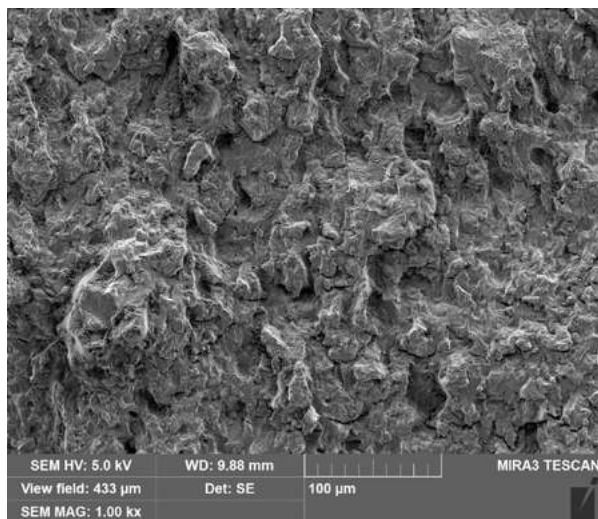
При достижении стадии ускоренного роста УТ размер локальной пластической зоны существенно возрастает (рис. 2), вызывая образование так называемого пластического шарнира, границы которого выходят на торцевую поверхность



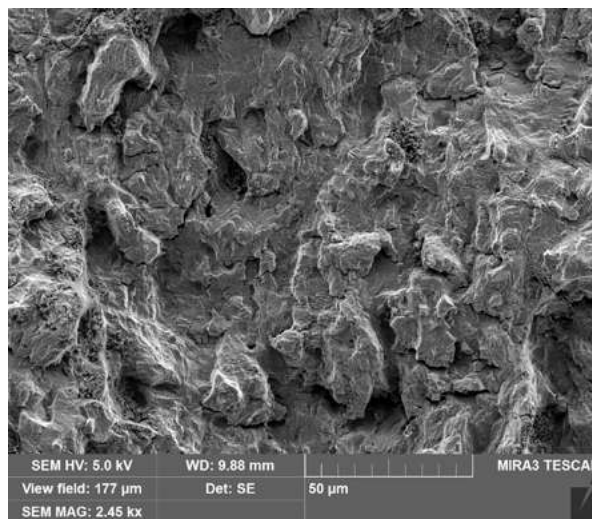
**Рис. 1.** Прямоугольный образец с односторонним боковым надрезом (образец ВР) для испытаний на циклическую трещиностойкость (скорость роста усталостной трещины)



**Рис. 2.** Образец ВР с усталостной трещиной на боковой поверхности после окончательного разрушения



*a*



*б*

**Рис. 3.** Микрорельеф поверхности усталостного разрушения при скоростях роста УТ  $v = (0,6 : 1,0) \cdot 10^{-7}$  м/цикл: *a* —  $\times 1000$ ; *б* —  $\times 2450$

образца при достижении предельного состояния, связанного с реализацией пластической неустойчивости процесса усталостного разрушения в процессе роста трещины. Анализ макрорельефа поверхности усталостного разрушения образца ВР показывает три характерные области: стабильного, ускоренного роста УТ и зона долома. На поверхности усталостного разрушения испы-

танных образцов ВР отчетливо выявляются две основные характерные области: развития усталостной трещины (относительно ровная поверхность с незначительной шероховатостью) и статического долома (поверхность с развитым, грубым, сильно шероховатым рельефом и отчетливо выявляемым утонением материала образца на боковых поверхностях в поперечном направлении).

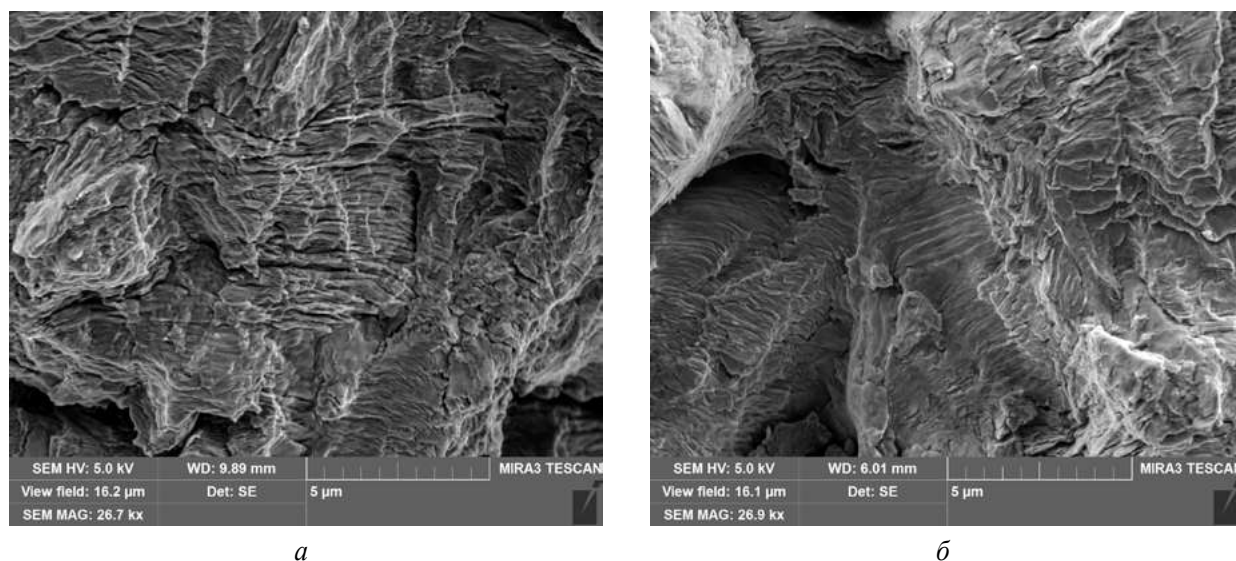


Рис. 4. Поперечные бороздки на поверхности усталостного разрушения, характеризующие рост УТ в литых сталях: *а* —  $\times 26700$ ; *б* —  $\times 26900$

В свою очередь, область развития УТ разделяется на две стадии: стабильного и ускоренного роста УТ. В изломе различие между этими стадиями выражается в увеличении шероховатости поверхности усталостного разрушения при приближении к области статического долома. Более детальный, микрофрактографический, анализ рельефа поверхности усталостного разрушения показывает, что при низких скоростях роста УТ (в начальной стадии стабильного роста УТ) формируется относительно грубый микрорельеф (рис. 3), характерный для литых сталей, на котором при больших увеличениях можно видеть наличие различного типа поперечных бороздок (рис. 4). Бороздчатый рельеф с поперечными трещинами свойственен участкам, на которых разрушение происходит по элементам литой структуры (рис. 4, *а*).

На участках, где видны относительно равномерные упорядоченные бороздки (рис. 4, *б*), рост трещины происходит по механизму образования одной бороздки за цикл нагружения, т. е., определив расстояние между соседними бороздками, можно приблизительно рассчитать скорость роста усталостной трещины. Такое сочетание различного типа бороздок свидетельствует о неравномерном подрастании трещины вдоль ее

фронта. Ближе к концу стабильного роста УТ (диапазон скоростей  $v = (4,0 : 6,0) \cdot 10^{-7}$  м/цикл) на поверхности разрушения появляются участки, содержащие скопления неметаллических включений, сферической формы, размер которых находится в диапазоне 1–2 мкм (рис. 5).

Микрорентгеноспектральный анализ (рис. 6) показывает, что основными составляющими этих включений являются алюминий, кислород, марганец и сера. Можно предположить, что это либо оксиды алюминия, либо сложные включения, состоящие из оксида алюминия и сульфида марганца.

На стадии ускоренного роста УТ можно наблюдать формирование фрагментированной блочной структуры с туннельным эффектом продвижения трещины (рис. 7).

Отчетливо видны как усталостные бороздки, так и многочисленные поперечные вторичные трещины, образование которых связано с развитой зоной локальной пластической деформации в вершине трещины, компоненты напряженного состояния (главные растягивающие напряжения) в которой имеют относительно высокие значения. Разрушение литой стали в зоне долома происходит в основном путем реализации вязких механизмов разрушения (рис. 8), ведущим из которых



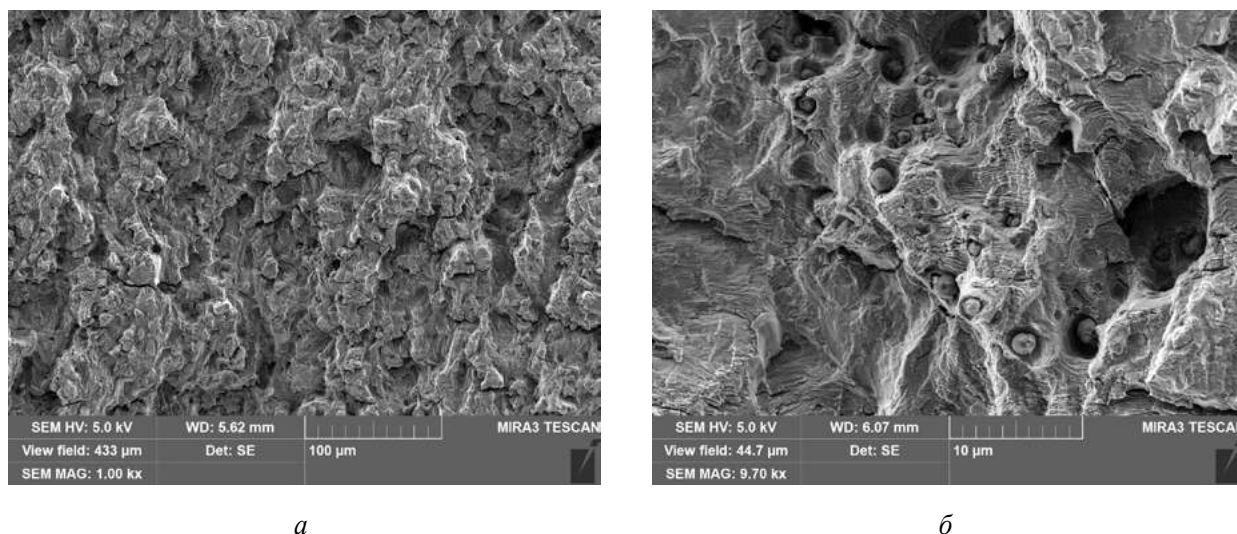


Рис. 5. Микрорельеф поверхности усталостного разрушения при скоростях роста УТ  $v = (4,0 : 6,0) \cdot 10^{-7}$  м/цикл: а —  $\times 1000$ ; б —  $\times 9700$

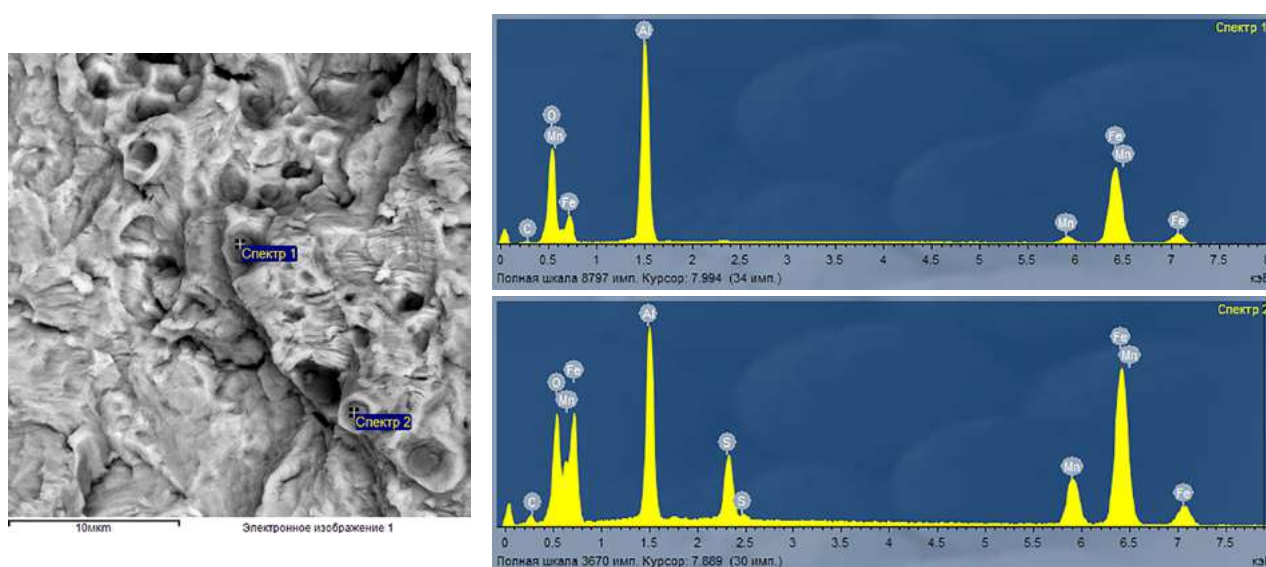


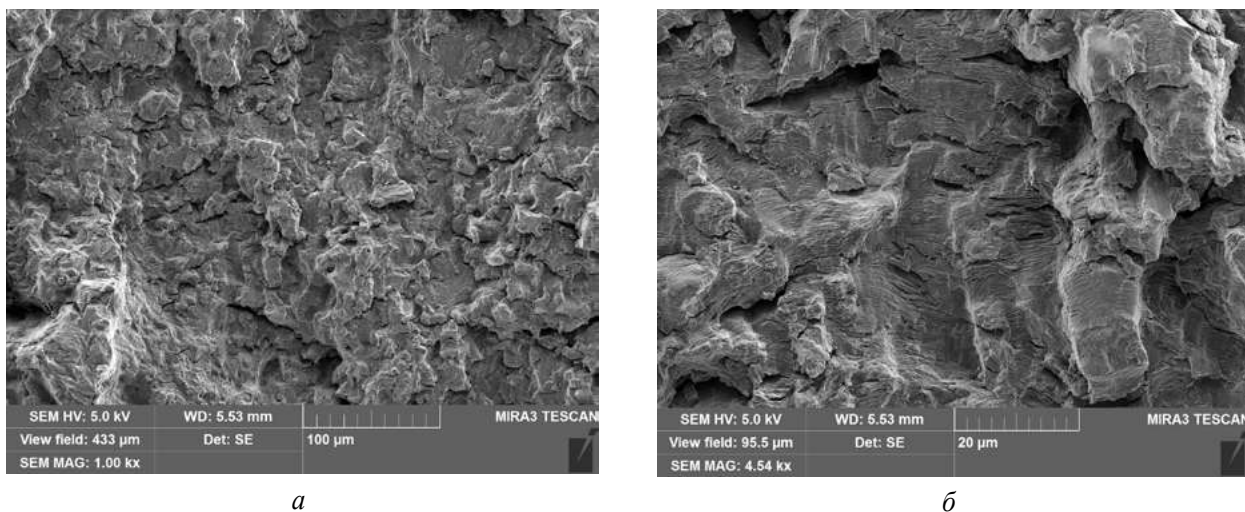
Рис. 6. Неметаллические включения на поверхности усталостного разрушения и их элементный состав

является ямочный (механизм слияния вязких ямок — рис. 8, б). Также встречаются локальные области, в которых разрушение происходит по фрагментам литой структуры, содержащей сульфидные включения (рис. 8, а).

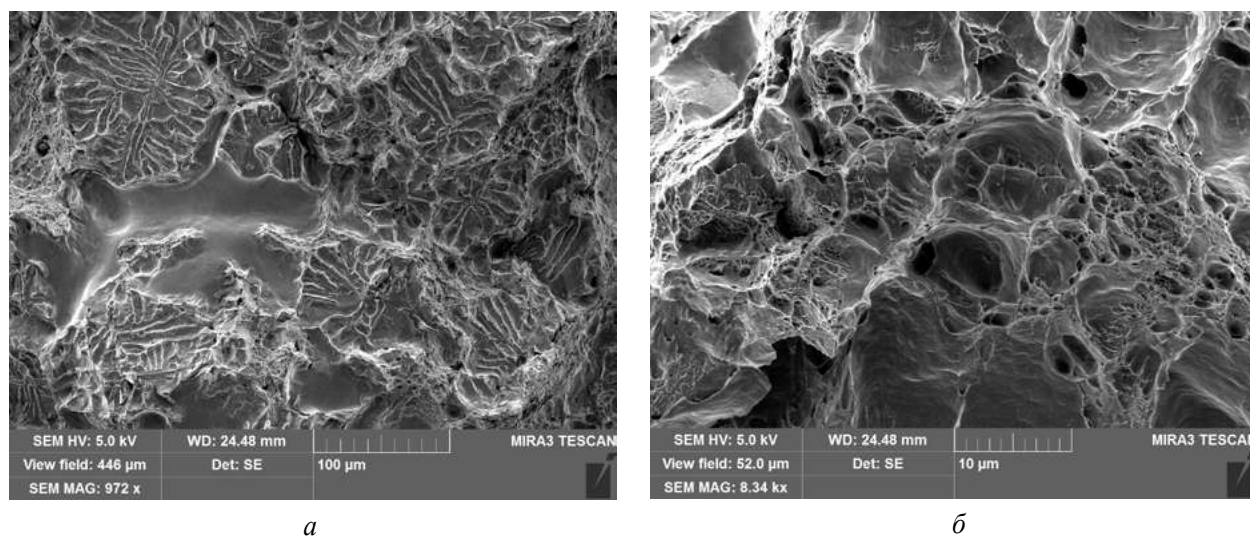
Вязкие ямки и включения на дне ямок представлены на рис. 9, а. Сравнительный элементный анализ показал, что данные включения имеют сложный состав, состоящий из оксида алюминия и сульфида марганца (рис. 9, б).

Для слежения за развитием усталостной трещины на боковых поверхностях образцов наносились риски (рис. 2) с шагом 1 мм. На основании полученного массива данных (длина трещины ( $l_{тр}$ ) — число циклов ( $N$ )), определенного на обеих поверхностях образцов, строилась осредненная зависимость  $l_{тр} = f(N)$ . Значения скорости роста трещины получали расчетным путем, аппроксимируя полученные результаты полиномиальной зависимостью.

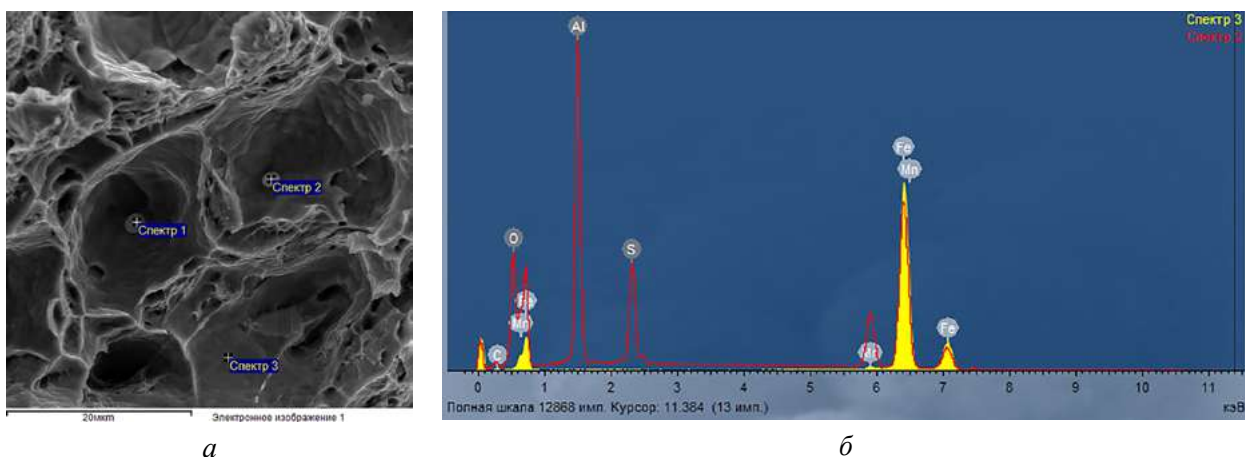




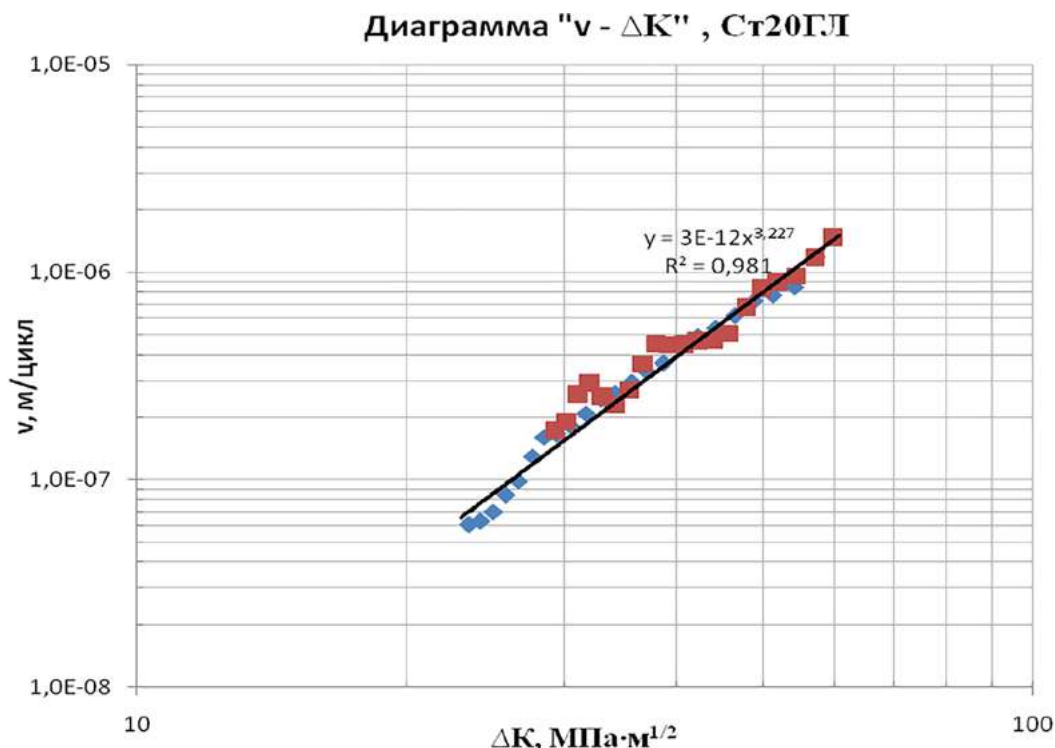
**Рис. 7.** Микрорельеф поверхности усталостного разрушения на стадии ускоренного роста УТ:  
*a* —  $\times 1000$ ; *б* —  $\times 4540$



**Рис. 8.** Микрорельеф поверхности усталостного разрушения в зоне долома:  
*a* — разрушение по фрагментам литой структуры ( $\times 972$ ); *б* — вязкий ямочный рельеф ( $\times 4540$ )



**Рис. 9.** Неметаллические включения на дне вязких ямок (*a*) и сравнительный элементный состав включений (спектр 2) и матрицы (спектр 3) (*б*)



**Рис. 10.** Кинетическая диаграмма усталостного разрушения стали 20ГЛ

Размах коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  определяли по формуле:

$$\Delta K = \frac{\Delta P \cdot (2 + \alpha)}{t \cdot B^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}} \cdot Y, \quad (1)$$

где  $Y = (0,886 + 4,64 \cdot \alpha + 13,32 \cdot \alpha^2 - 14,72 \cdot \alpha^3 + 5,6 \cdot \alpha^4)$ ;

$t$  — толщина образца;

$B$  — характерная длина;

$\alpha = l_{тр}/B$ .

На основании полученного массива данных: скорость роста усталостной трещины ( $v$ ) — размах коэффициента интенсивности напряжений ( $\Delta K$ ) строилась кинетическая диаграмма усталостного разрушения (рис. 10) в двойных логарифмических координатах  $\lg(v)$  —  $\lg(\Delta K)$ . Как было упомянуто выше, результаты циклических испытаний по определению скорости роста усталостной трещины представляют в виде кинетической диаграммы роста усталостной трещины (рис. 10). Для получения количественных оценок развития УТ необходимо полученные результаты

представить в виде соответствующей зависимости, связывающей скорость роста УТ и размах коэффициента интенсивности напряжений. Наибольшее распространение получила зависимость, предложенная Пэрисом и Эрдоганом в следующем виде:

$$v = C \left( \left[ \Delta K \right] \right)^m, \quad (2)$$

где  $C$  и  $m$  — постоянные.

Описание скорости роста УТ с помощью зависимости (2) позволяет в большинстве случаев получать корректные количественные оценки с приемлемой для практических целей точностью. Как видно из полученной диаграммы, зависимость (2) с высокой степенью точности описывает результаты эксперимента. Значения постоянных:  $C = 3 \cdot 10^{-12}$ ,  $m \approx 3,22$ .

Таким образом, с помощью зависимости (2) можно получать оценки работоспособности материала с трещиной и прогнозировать его живучесть.

**Библиографический список**

1. ГОСТ 32400—2013. Рама боковая и балка наддрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 2013.
2. Бороненко Ю. П. Стратегические задачи вагоностроители в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт РФ. — 2013. — № 5(48). — С. 68–74.
3. Бороненко Ю. П. Выбор технико-экономических параметров и перспективы внедрения инновационных вагонов габарита Тпр / Ю. П. Бороненко // Транспорт РФ. — 2015. — № 3(58). — С. 3–6.
4. Орлова А. М. Совершенствование требований к литым боковым рамам и набрессорным балкам для повышения их надежности / А. М. Орлова, И. В. Сухих, И. В. Забадыкин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. Тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2013. — С. 154–157.
5. Сухих И. В. Зоны повышенной ответственности литых рам и балок трехэлементных тележек грузового вагона и их определение методом сопротивления усталости / И. В. Сухих, И. В. Забадыкин, И. В. Турутин и др. // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы X Международной научно-технической конференции. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. — С. 40–42.
6. Змеева В. Н. Статистические закономерности развития усталостных трещин в литых сталях деталей грузовых вагонов / В. Н. Змеева, С. Г. Лебединский // Вестник ВНИИЖТ. — 1999. — № 3. — С. 26–31.
7. Северинова Т. П. Исследование трещиностойкости сталей литых деталей тележек грузовых вагонов после

длительного периода эксплуатации / Т. П. Северинова // Вестник ВНИИЖТ. — 1999. — № 3. — С. 35–40.

8. Расщепкина Д. В. Работоспособность боковых рам тележек грузовых вагонов после возникновения опасного отказа / Д. В. Расщепкина, А. В. Якушев // Транспорт Урала. — 2018. — № 3(58). — С. 30–34.

9. Ефимов В. П. Тележка для грузовых вагонов нового поколения с повышенными осевыми нагрузками / В. П. Ефимов, А. А. Пранов, А. Н. Баранов и др. // Железнодорожный транспорт. — 2009. — № 6. — С. 58–61.

10. Лосев Д. Н. Опыт эксплуатации и дальнейшие пути развития технического обслуживания инновационных вагонов на тележках Barber S-2-R / Д. Н. Лосев // Транспорт РФ. — 2014. — № 3(52). — С. 24–28.

11. РД 50-345—82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических исследований металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические указания. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 95 с.

Дата поступления: 25.01.2023

Решение о публикации: 15.02.2023

**Контактная информация:**

ДАНИЛЕНКО Денис Викторович —

руководитель департамента

ЕФИМОВ Виктор Петрович —

канд. техн. наук, доц., генеральный директор;

uiz123456@mail.ru

ЧЕРНОВ Владимир Александрович —

доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»

## Exploration of Cyclic Crack Resistance of Steel of Molten Load-Bearing Parts for Freight Cars

D. V. Danilenko<sup>1</sup>, V. P. Efimov<sup>2</sup>, V. A. Chernov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LLC “RM RAIL Management Company”, 11, Lodygina str., Saransk, 430006, Russian Federation

<sup>2</sup>LLC “UIC — Wagons”, 22, sq. 28, Ordzhonikidze str., Nizhny Tagil, 622007, Russian Federation

<sup>3</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Danilenko D. V., Efimov V. P., Chernov V. A. Exploration of Cyclic Crack Resistance of Steel of Molten Load-Bearing Parts for Freight Cars // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 60–69. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-60-69

## Summary

**Purpose:** Carrying out complex experimental studies of cyclic crack resistance of molten steel which is used for load-bearing parts of freight wagon running systems with kinetic diagram building for fatigue failure. **Methods:** Method of mechanical testing of molten steel samples under cyclic loading conditions was applied, the method makes it possible to obtain quantitative estimates of stuff ability to resist fatigue failure on the stage of fatigue crack development (testing on cyclic crack resistance). To study the surface of fatigue failure, relief micrographic analysis was used. To study molten steel elemental composition and the mechanisms of fatigue crack development, X-ray micro-spectral analysis was used on fatigue failure various stages. **Results:** The results of the research of cyclic crack resistance of 20 ГЛJ molten steel, which is used for load-bearing parts of freight cars, are presented. Fatigue failure kinetic diagram has been built, detailed micrographic analysis of fatigue failure surface has been carried out and elemental composition of non-metallic inclusions has been studied. **Practical significance:** Based on the research results, it is possible to assess the performance of 20 ГЛJ steel with cracks and to predict survivability. The results obtained make it possible to improve the methods of resource projection of molten bearing parts for freight wagon running systems in order to increase their operational reliability. The research results are used by enterprises - manufacturers of molten parts to control technology stability and to improve product quality.

**Keywords:** Cycle fatigue crack resistance, molten bearing parts, freight car bogie, survivability, X-ray micro-spectral analysis of molten steel, fatigue crack growth rate.

## References

1. GOST 32400—2013. *Rama bokovaya i balka nadresornaya litye telezhek zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 32400—2013. Cast side frame and bolster for bogies of railway freight cars. Specifications]. (In Russian)
2. Boronenko Yu. P. Strategicheskie zadachi vagonostroiteli v razvitii tyazhelovesnogo dvizheniya [Strategic tasks of car builders in the development of heavy-haul traffic]. *Transport RF* [Transport of the Russian Federation]. 2013, Iss. 5(48), pp. 68–74. (In Russian)
3. Boronenko Yu. P. Vybory tekhniko-ekonomicheskikh parametrov i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh vagonov gabarita Tpr [The choice of technical and economic parameters and the prospects for the introduction of innovative wagons of Tpr size]. *Transport RF* [Transport of the Russian Federation]. 2015, Iss. 3(58), pp. 3–6. (In Russian)
4. Orlova A. M., Sukhikh I. V., Zabadykin I. V. *Sovershenstvovanie trebovaniy k litym bokovym ramam i nabressornym balkam dlya povysheniya ikh nadezhnosti. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty. Tezisy dokladov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Improving the requirements for cast side frames and bolster beams to improve their reliability. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects. Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2013, pp. 154–157. (In Russian)
5. Sukhikh I. V., Zabadykin I. V., Turutin I. V. et al. *Zony povyshennoy otvetstvennosti litykh ram i balok trekhelementnykh telezhek gruzovogo vagona i ikh opredelenie metodom soprotivleniya ustalosti. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: materialy Kh Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Zones of increased responsibility of cast frames and beams of three-element freight car bogies and their determination by the fatigue resistance method. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the X International Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2015, pp. 40–42. (In Russian)
6. Zmeeva V. N., Lebedinsky S. G. Statisticheskie zakonomernosti razvitiya ustalostnykh treshchin v litykh stalyakh detaley gruzovykh vagonov [Statistical patterns of development of fatigue cracks in cast steels of freight car parts]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1999, Iss. 3, pp. 26–31. (In Russian)
7. Severinova T. P. *Issledovanie treshchinostoykosti staley litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov posle*

dlitel'nogo perioda ekspluatatsii [Investigation of crack resistance of steels of cast parts of freight car bogies after a long period of operation]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1999, Iss. 3, pp. 35–40. (In Russian)

8. Rasshchepkina D. V., Yakushev A. V. Rabotosposobnost' bokovykh ram telezhok gruzovykh vagonov posle vozniknoveniya opasnogo otkaza [Performance of side frames of freight car bogies after the occurrence of a dangerous failure]. *Transport Urala* [Transportation of the Urals]. 2018, Iss. 3(58), pp. 30–34. (In Russian)

9. Efimov V. P., Pranov A. A., Baranov A. N. et al. Bogie for new generation freight cars with increased axial loads [Bogie for freight cars of a new generation with increased axial loads]. *Zheleznodorozhny transport* [Railway transport]. 2009, Iss. 6, pp. 58–61. (In Russian)

10. Losev D. N. Opyt ekspluatatsii i dal'neyshie puti razvitiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya innovatsionnykh vagonov na telezhkakh Barber S-2-R [Operating experience and further ways of developing the maintenance of innovative cars on Barber S-2-R bogies]. *Transport RF* [Transport of the Russian Federation]. 2014, Iss. 3(52), pp. 24–28. (In Russian)

11. RD 50-345—82. Raschety i ispytaniya na prochnost'. *Metody mekhanicheskikh issledovaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri tsiklicheskom nagruzhении. Metodicheskie ukazaniya* [RD 50-345—82. Calculations and strength tests. Methods of mechanical research of metals. Determination of characteristics of crack resistance (fracture toughness) under cyclic loading. Guidelines]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1983, 95 pp. (In Russian)

Received: January 25, 2023

Accepted: February 15, 2023

**Author's information:**

Denis V. DANILENKO — Head of the Department

Viktor P. EFIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; uiz123456@mail.ru

Vladimir A. CHERNOV — Associate Professor, Department of Wagons and Wagon Industries



УДК 378.14

## Актуальные вопросы организации деятельности цифровой кафедры в условиях цифровой трансформации вуза

С. Г. Ермаков, С. М. Куценко, Р. Г. Гильванов

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

**Для цитирования:** Ермаков С. Г., Куценко С. М., Гильванов Р. Г. Актуальные вопросы организации деятельности цифровой кафедры в условиях цифровой трансформации вуза // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 70–78. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-70-78

### Аннотация

**Цель:** Рассмотрены этапы становления в университете нового направления «Цифровая кафедра», что позволяет в том числе по-новому сформулировать термин «цифровизация». **Методы:** Изучено зарождение термина «цифровизация» в университете. Показана эволюция понятий «автоматизация», «информатизация», «цифровизация», которые определяют плавный переход к новому направлению в вузах — «цифровая кафедра» и, как следствие, «цифровой вуз». **Результаты:** Сформулирована модель «цифрового вуза», состоящая из таких важнейших компонентов, как «инфраструктура», «программные платформы», «информационные системы», «корпоративное хранилище данных» и «цифровые сервисы». Продемонстрированы возможности «цифровой кафедры» в университете в части реализации образовательной программы «Цифровые технологии на железнодорожном транспорте» и таких значимых направлений, как интернет вещей, большие данные, системы виртуальной и дополненной реальности, искусственный интеллект, «цифровой двойник», системы распределенного реестра (основные тренды последних лет в области цифровой экономики). **Практическая значимость:** Показаны возможности «цифровой кафедры» с точки зрения единого подхода к масштабному обучению цифровым компетенциям обучающихся практически всех не ИТ-специальностей и направлений подготовки. Изложен опыт внешнего контроля — от создания до обучения — Министерством науки и высшего образования РФ и Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ посредством Университета Иннополис. Авторы статьи пытаются ответить на актуальные в данной сфере вопросы: каким образом современные цифровые сервисы непосредственно влияют на особенности обучения в профессиональном образовании? какова модель управления «цифровым вузом»? из каких компонентов он состоит?

**Ключевые слова:** Цифровизация, цифровая трансформация вуза, цифровая кафедра, цифровые компетенции.

В связи с новыми достижениями в области применения электронного обучения и дистанционных образовательных технологий мы все больше замечаем потребность их внедрения в образователь-

ный процесс высшего, школьного и дошкольного образования. Проблема качества обучения на всех уровнях была, есть и будет главной целью Российской Федерации. Мы видим, как ежегодно обнов-



ляются федеральные образовательные стандарты высшего и среднего образования. Вводятся новые универсальные компетентности, общепрофессиональные и профессиональные компетентности, с учетом соответствия их профессиональным стандартам. Успешность внедрения новых достижений науки и техники во многом зависит от степени готовности образовательных организаций и их руководителей, от степени профессионализма педагогических работников, от степени готовности и ответственности руководителей отраслевых органов исполнительной власти.

Процесс приобретения знаний и умений обучающимися реализуется в соответствии с обобщенными трудовыми функциями, а процесс приобретения навыков реализуется через трудовые действия. Это направлено на поддержание квалификации специалиста, на повышение его компетентности, на готовность его к обучению, освоению новой профессии.

Основным вызовом цифровой трансформации вуза является влияние учебного процесса на качество итогового образовательного результата, а также повышение мотивации студентов и преподавателей, формирование и эффективное освоение индивидуальных образовательных траекторий [1, 2]. Цифровая трансформация должна изменить технологию образования, сформировать эффективные методы использования существующих информационных систем для передачи знаний, компетенций, навыков и квалификаций, с учетом формирования индивидуальных траекторий обучающихся. К 2030 году вузы должны готовить специалистов, способных в своих предметных областях проводить предиктивную аналитику данных, собираемых и генерируемых информационными системами (платформами), а также интерпретировать альтернативы и оценивать сценарные решения. Для современных студентов цифровая среда должна быть естественным окружением, вследствие чего вуз должен

меняться в соответствии с требованиями времени и под запросы обучающихся.

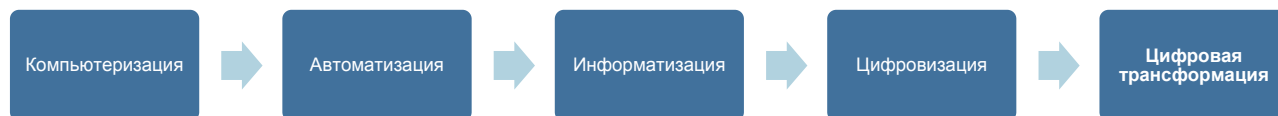
Инициатором нового совместного проекта явились два министерства: Министерство науки и высшего образования и Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Совместный проект направлен на создание возможностей для повышения квалификации и получения новой профессии в сфере информационных технологий. Современный рынок требует цифровых компетенций, отражающих знания, умения, мотивацию и ответственность по четырем направлениям (информационная и медиакомпетентность, коммуникация, техносфера и потребление), в которых должны быть отражены индикаторы компетенций, связанных обобщенной трудовой функцией, трудовыми функциями и трудовыми действиями [3–8].

Особая роль отводится проекту «Цифровые кафедры», реализация которого будет способствовать значительному повышению компетентности обучаемых и, как следствие, преобразованию существующих вузов в более эффективные «цифровые вузы».

Под «цифровым вузом» будем понимать образовательную организацию, деятельность которой (процессы управления, технологии обучения, сервисы для работников и студентов и пр.) основана на использовании информационно-телекоммуникационных технологий и оборудования, при этом принятие управленческих бизнес-решений осуществляется автоматически или автоматизировано на основании заранее заданных целей, критериев и пр. Здесь преследуется главная цель — как осуществить трансформацию базовых процессов образовательной деятельности с помощью информационно-телекоммуникационных технологий [9].

Ретроспектива понятия «цифровой вуз» базируется на эволюции следующих процессов: компьютеризации, автоматизации, информатизации, цифровизации, цифровой трансформации.





Компьютеризация — оснащение рабочих мест работников средствами вычислительной техники и периферийного оборудования и применение их в образовательном процессе.

Автоматизация — использование технических и математических инструментов в целях освобождения работников и студентов от участия в процессах получения, преобразования, передачи информации либо существенного уменьшения степени этого участия или трудоемкости выполняемых операций.

Информатизация — комплексное построение информационной системы вуза.

«Информатизация» перенесла акцент с создания отдельной ИКТ-системы для автоматизации каких-либо функций или отдельных процессов к комплексному построению информационной системы вуза, направленной на эффективное управление в целом. По сути, информатизация — это автоматизация, только с более «комплексным» подходом.

Такие информационные системы требуют создания хранилищ данных, разработки специальных алгоритмов для их обработки и их представления в удобной форме для обеспечения своевременного и правильного принятия решения.

Мы уже знаем, что такие системы есть. Они специально предназначены для принятия решений на основе анализа больших объемов информации, и их относят к классам Big Data, Machine Learning, Deep Learning и пр. вплоть до искусственного интеллекта (Artificial Intelligence). Такие системы требуют наличия подготовленных специалистов по управлению данными.

С течением времени данные стали играть все большую роль в вопросах автоматизации и информатизации, они становятся значимо необходимыми и ценными для принятия управ-

ленческих бизнес-решений. Стали создаваться хранилища данных и автоматические процессы обработки информации для принятия оперативных и стратегических решений. Наличие хранилища данных и принятие бизнес-решений на основе анализа большого количества данных — составная часть любого современного проекта по автоматизации, но чем больше данных содержит хранилище и чем более сложные алгоритмы анализа, тем выше уровень автоматизации [10]. По мере развития различных аналитических информационных систем и решений, а также в связи со значительным ростом накапливаемой и обрабатываемой вузами информации обработка данных становится все более сложной, а информационные системы — более мощными и обладающими развитым функционалом.

С учетом вышеизложенного термин «цифровизация» можно сформулировать как деятельность, направленную на использование цифровых технологий при принятии управленческих решений, т. е. внедрение цифровых технологий («цифры») в образовательные, финансово-хозяйственные, административные процессы вуза для повышения качества образования и экономических показателей вуза. В процессе этой деятельности мы должны завершить процесс полной замены ручных, традиционных и устаревших способов осуществления деятельности и управления новейшими цифровыми альтернативами. Появятся «цифровые сервисы, которые должны обеспечить всех пользователей сервиса (студентов, профессорско-преподавательский состав, административный персонал вуза) удаленным доступом к определенным информационно-коммуникационным ресурсам, средам, инструментам, необходимым пользователям для их эффективной работы, современного обучения, исследований, тести-

рования знаний и навыков, накопления опыта в цифровом пространстве, придания публичности опыту вуза в рамках мирового сообщества.



Эффективность деятельности с учетом вышеизложенного во многом будет зависеть от кадрового обеспечения, от укомплектованности ИТ структурных подразделений вуза.

Одним из приемлемых способов разрешения сложившейся ситуации является эффективная и оперативная подготовка студентов, направленная на освоение современных цифровых технологий, в рамках реализации проекта «Цифровая кафедра» [11].

Таким образом, актуальным направлением деятельности в рамках проекта «Цифровая кафедра» является разработка качественной образовательной программы с привлечением экспертов и практиков ИТ-компаний [12].

Для реализации столь масштабного проекта подключено множество экспертов [13], но основным исполнителем выбран Университет Иннополис (республика Татарстан). На рис. 1 приведены грандиозные прогнозные показатели, которые позволяют ожидать, что более 900 тыс. человек будут в той или иной мере владеть цифровыми компетенциями в своей профессиональной деятельности [14].



Рис. 1. Планируемые значения обучающихся на «цифровых кафедрах» в университетах — участников и кандидатов программы развития образовательных организаций высшего образования в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» [14]

В ПГУПС разрабатываемая дополнительная профессиональная программа (программа профессиональной переподготовки) «Цифровые технологии на железнодорожном транспорте» направлена на развитие навыков применения языка программирования при решении профессиональных задач. Также обучающиеся по данной программе освоят компетенции в области разработки информационных моделей объектов,

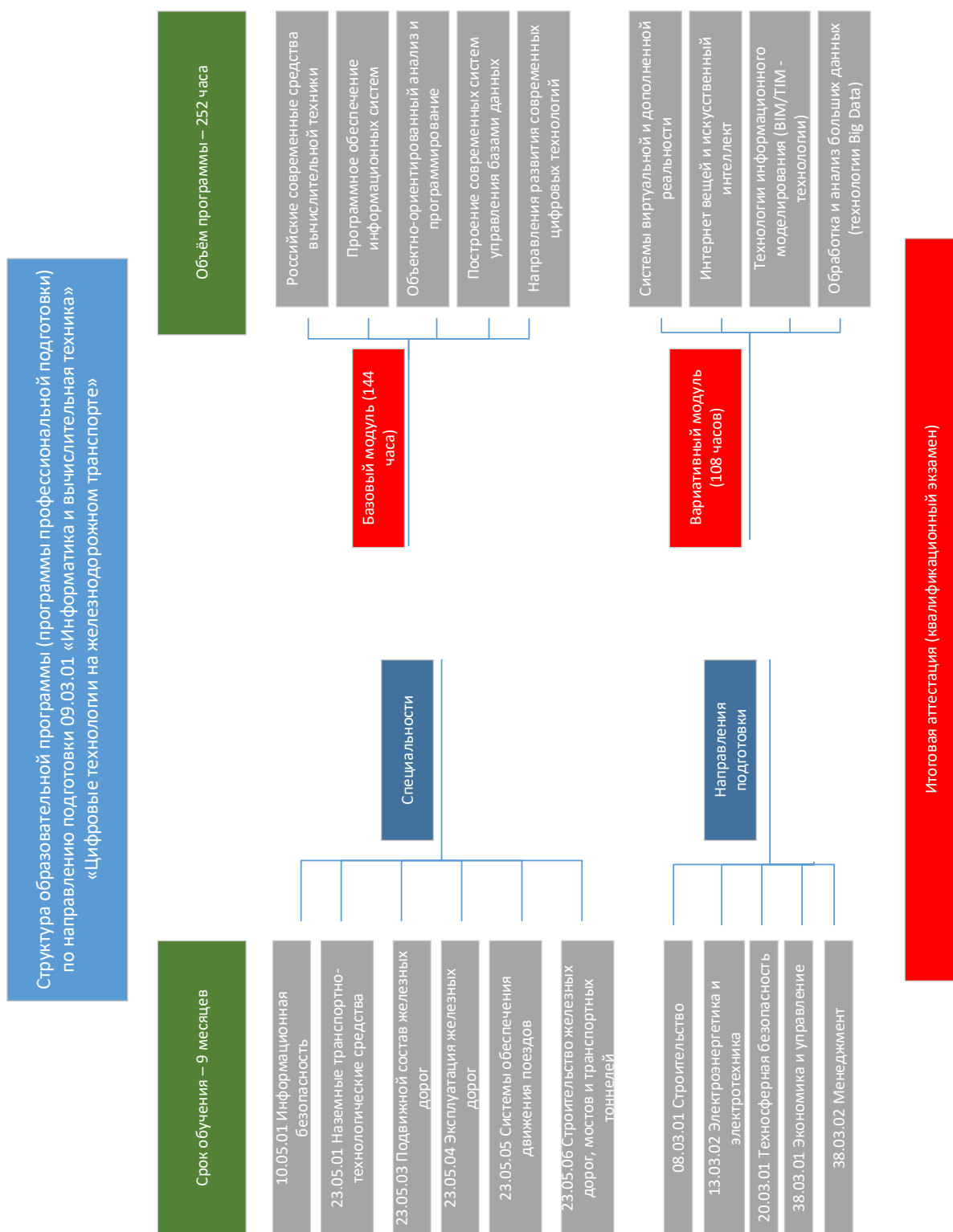


Рис. 2. Структура образовательной программы «Цифровые технологии на железнодорожном транспорте»

обработки и анализа больших данных, создания моделей виртуальной и дополненной реальности, интернета вещей и блокчейн-технологий.

Уникальность программы заключается в том, что у студентов ПГУПС всех специальностей и направлений подготовки появилась возможность получить знания и навыки по развитию цифровых компетенций. Разрабатываемые профессорско-преподавательским составом электронные учебные курсы позволят узнать о современных средствах вычислительной техники, об актуальном программном обеспечении, применяемом в информационных системах (здесь обучающиеся получают навыки программирования). Также они узнают об особенностях объектно-ориентированного анализа, работы с системами управления базами данных, направлениями развития современных цифровых технологий. Изучив теоретические курсы, обучающиеся выбирают любой из четырех предложенных образовательных модулей с целью практического применения полученных знаний для решения своих профессиональных задач [15]. Более подробно программа представлена на рис. 2.

Программа прошла внешнюю экспертизу рабочей группы «Транспортная инфраструктура», которая была создана на базе Университета Иннополис с привлечением ведущих работодателей в области транспорта.

Особенностью обучения является то, что входной, промежуточный и выходной контроль знаний и умений осуществляется независимой внешней оценкой. Проектом «Цифровая кафедра» предусмотрено, что так называемый ассессмент осуществляется Университетом Иннополис, что, несомненно, повысит качество подготовки обучающихся.

Таким образом, организации деятельности цифровой кафедры в условиях цифровой трансформации вуза преследует цель обеспечения качества образования за счет или через трансфор-

мацию таких блоков, как «Цифровые сервисы», «Информационные системы», «Управление данными», «Инфраструктура», «Кадры», что, безусловно, позволит перейти на более качественный и современный уровень подготовки высококвалифицированных специалистов, которые, помимо основной профессии, владеют и цифровыми компетенциями.

### Библиографический список

1. Пирогланов Ш. Ш. Цифровые технологии в образовательном процессе как новые возможности реализации индивидуальных образовательных траекторий / Ш. Ш. Пирогланов, В. П. Скляров, И. С. Анцупов // Проблемы современного педагогического образования. — 2022. — № 74-2. — С. 180–182.
2. Распоряжение Правительства РФ от 21 декабря 2021 г. № 3759-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации науки и высшего образования».
3. Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» (с изменениями и дополнениями).
4. Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».
5. Концепция развития регулирования отношений в сфере технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 августа 2020 г. № 2129-р.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 14 марта 2022 г. № 357 «Изменения, которые вносятся в Постановление Правительства Российской Федерации от 13 мая 2021 г. № 729».
7. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». Сформирована национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации».

8. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р.

9. Коротовских А. Е. Влияние типа стратегии цифровой трансформации на эффективность программы цифровой трансформации / А. Е. Коротовских // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: сборник научных статей Международной научной конференции, Волгоград, 2022. — М.: Конверт.

10. Новикова О. Г., Андреев В. А. Создание прототипа интегрированной среды хранилища больших данных для образовательных порталов вузов / О. Г. Новикова, В. А. Андреев // Математические методы в технике и технологиях. — ММТТ, 2019. — Т. 12-1. — С. 69–72.

11. Постановление Правительства РФ от 13 мая 2021 года № 730 «О Совете по поддержке программ развития образовательных организаций высшего образования в рамках реализации программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”».

12. Арстангалеева Г. Ф. Оценка сформированности цифровых компетенций педагогических работников / Г. Ф. Арстангалеева, М. Н. Тезина, С. М. Слободчикова // Отечественная и зарубежная педагогика. — 2022. — Т. 1. — № 3(84). — С. 140–155.

13. Участники программы «Приоритет-2030» запускают новый масштабный проект «Цифровые кафедры» // Ректор вуза. — 2022. — № 5. — С. 46–47.

14. 115 университетов с сентября открывают набор студентов на «цифровые кафедры» // Ректор вуза. — 2022. — № 8. — С. 58–59.

15. Куценко С. М. Цифровизация учебного процесса транспортного университета / С. М. Куценко, Е. В. Казакевич, О. П. Шаблюк // Техник транспорта: образование и практика. — 2022. — Т. 3. — № 1. — С. 57–62.

Дата поступления: 20.01.2023

Решение о публикации: 01.03.2023

#### Контактная информация:

ЕРМАКОВ Сергей Геннадьевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Информационные и вычислительные системы»

КУЦЕНКО Сергей Михайлович — канд. техн. наук, доц., декан факультета безотрывных форм обучения; kutsenko@pgups.ru

ГИЛЬВАНОВ Ринат Гафганович — канд. воен. наук, доц., доц. кафедры «Информационные и вычислительные системы»

## Topical Issues of Organizing Digital Department Activities in the Context of University Digital Transformation

S. G. Ermakov, S. M. Kutsenko, R. G. Gilvanov

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

**For citation:** Ermakov S. G., Kutsenko S. M., Gilvanov R. G. Topical Issues of Organizing Digital Department Activities in the Context of University Digital Transformation // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 70–798. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-70-78

### Summary

**Purpose:** The stages of becoming in a university of new trend “Digital Department” which allows also to formulate term “digitalization” anew. **Methods:** The birth of term “digitalization” in a university has been studied. The evolution of notions “automation”, “informatization”, “digitalization” which predetermine smooth transfer to new trend in universities — “digital department” and, hence, “digital university”, has been shown. **Results:** “Digital university” model has been formulated that consists of such important components as “infrastructure”, “programmatic platforms”, “informational systems”, “data corporative storage” and “digital

services”. “Digital department” possibilities in a university have been demonstrated in the part of realization of “Digital technologies on railway transport” educational program and such notional trends as internet of things, big data, virtual and augmented reality systems, artificial intelligence, “digital twin”, distributed ledger systems (recent years major trends in digital economy sphere). **Practical significance:** “Digital department” possibilities from the point of uniform approach to widescale teaching digital competences to students of almost all IT specialties and training trends have been demonstrated. The experience of external control has been narrated — from making to teaching — by Science and Higher Education Ministry and Digital Development, Communication and Mass Communications Ministry of Russian Federation by means of Innopolis University. The article authors make an attempt to answer topical in this sphere questions: how modern digital services immediately influence training features in professional education? Which is management model of “digital university”? Which components it consists of?

**Keywords:** Digitalization, university digital transformation, digital department, digital competencies.

## References:

1. Piroglanov Sh. Sh., Sklyarov V. P., Antsupov I. S. Tsifrovyye tekhnologii v obrazovatel'nom protsesse kak novyye vozmozhnosti realizatsii individual'nykh obrazovatel'nykh trayektoriy [Digital technologies in the educational process as new opportunities for the implementation of individual educational trajectories]. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya* [Problems of modern pedagogical education]. 2022, Iss. 74-2, pp. 180–182. (In Russian)
2. *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 21 dekabrya 2021 g. № 3759-r “Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti tsifrovoy transformatsii nauki i vysshego obrazovaniya”* [Decree of the Government of the Russian Federation of December 21, 2021 № 3759-r “On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of science and higher education”]. (In Russian)
3. *Ukaz Prezidenta RF ot 7 maya 2018 g. № 204 “O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda” (s izmeneniyami i dopolneniyami)* [Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2018 № 204 “On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024” (with amendments and additions)]. (In Russian)
4. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 21 iyulya 2020 g. № 474 “O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda”* [Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 № 474 “On the National Development Goals of the Russian Federation for the period up to 2030”]. (In Russian)
5. *Kontseptsiya razvitiya regulirovaniya otnosheniy v sfere tekhnologiy iskusstvennogo intellekta i robototekhniki do 2024 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 avgusta 2020 g. № 2129-p* [The concept of development of regulation of relations in the field of artificial intelligence technologies and robotics until 2024. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated August 19, 2020 № 2129-p]. (In Russian)
6. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 14 marta 2022 g. № 357 “Izmeneniya, kotoryye vnosyatsya v Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 13 maya 2021 g. № 729”* [Decree of the Government of the Russian Federation of March 14, 2022 № 357 “Changes to the Decree of the Government of the Russian Federation of May 13, 2021 No. 729”]. (In Russian)
7. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 7 maya 2018 goda № 204 “O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda” sformirovana natsional'naya programma “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii”* [Decree of the President of the Russian Federation dated May 7, 2018 № 204 “On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024”. The national program “Digital Economy of the Russian Federation” has been formed]. (In Russian)
8. *Programma “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii”. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva*

Rossiyskoy Federatsii ot 28 iyulya 2017 g. № 1632-r [Program “Digital Economy of the Russian Federation”. Approved by Order of the Government of the Russian Federation of July 28, 2017 № 1632-r]. (In Russian)

9. Korotovskikh A. Ye. *Vliyaniye tipa strategii tsifrovoy transformatsii na effektivnost' programmy tsifrovoy transformatsii. Innovatsionnyye tekhnologii, ekonomika i menedzhment v promyshlennosti. Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Volgograd, 2022* [Influence of the type of digital transformation strategy on the effectiveness of the digital transformation program. Innovative technologies, economics and management in industry: collection of scientific articles of the International Scientific Conference, Volgograd, 2022]. Moscow: Konvert Publ. (In Russian)

10. Novikova O. G., Andreyev V. A. *Sozdaniye prototipa integrirovannoy sredy khranilishcha bol'shikh dannykh dlya obrazovatel'nykh portalov vuzov* [Creation of a prototype of an integrated environment for big data storage for educational portals of universities]. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technology]. MMTT, 2019, vol. 12-1, pp. 69-72. (In Russian)

11. *Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 13 maya 2021 goda № 730 “O Sovete po podderzhke programm razvitiya obrazovatel'nykh organizatsiy vysshego obrazovaniya v ramkakh realizatsii programmy strategicheskogo akademicheskogo liderstva “Prioritet-2030”* [Decree of the Government of the Russian Federation of May 13, 2021 № 730 “On the Council for Supporting Development Programs of Educational Institutions of Higher Education as part of the implementation of the Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030”]. (In Russian)

12. Arstangaleyeva G. F., Tezina M. N., Slobodchikova S. M. *Otsenka sformirovannosti tsifrovyykh kompetentsiy*

pedagogicheskikh rabotnikov [Assessment of the formation of digital competencies of pedagogical workers]. *Otechestvennaya i zarubezhnaya pedagogika* [Domestic and foreign pedagogy]. 2022, vol. 1, Iss. 3(84), pp. 140–155. (In Russian)

13. *Uchastniki programmy “Prioritet-2030” zapuskayut novyy masshtabnyy proyekt “Tsifrovyye kafedry”* [Participants of the “Priority-2030” program launch a new large-scale project “Digital Departments”]. *Rektor vuza* [Rector of the university]. 2022, Iss. 5, pp. 46–47. (In Russian)

14. *115 universitetov s sentyabrya otkryvayut nabor studentov na “tsifrovyye kafedry”* [115 universities from September open the enrollment of students for “digital departments”]. *Rektor vuza* [Rector of the university]. 2022, Iss. 8, pp. 58–59. (In Russian)

15. Kutsenko S. M., Kazakevich Ye. V., Shablyuk O. P. *Tsifrovizatsiya uchebnogo protsessa transportnogo universiteta* [Digitalization of the educational process of the transport university]. *Tekhnika transporta: obrazovaniye i praktika* [Transport technician: education and practice]. 2022, vol. 3, Iss. 1, pp. 57–62. (In Russian)

Received: January 20, 2023

Accepted: March 01, 2023

#### Author's information:

Sergey G. ERMAKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department “Information and Computing Systems”

Sergey M. KUTSENKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the Faculty of Continuous Forms of Education; kutsenko@pgups.ru

Rinat G. GILVANOV — PhD in Military Sciences, Associate Professor, Department of Information and Computing Systems



УДК 621.644, 628.14

## Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке

О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская

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

**Для цитирования:** Капинос О. Г., Твардовская Н. В. Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 79–90. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90

### Аннотация

**Цель:** Установить факторы, в наибольшей степени влияющие на риск возникновения гидравлических ударов в напорных трубопроводах. Определить скорости распространения фронта ударной волны. Провести расчеты параметров возможного гидравлического удара в зависимости от толщины стенки трубопровода. **Методы:** Метод характеристик, используемый для решения дифференциальных уравнений неустановившегося движения жидкости, положен в основу расчетной модели для определения параметров потока при возникновении гидравлических ударов. **Результаты:** На основе проведенных расчетов в статье анализируются диаграммы изменения давления в напорном трубопроводе из стальных труб. Производится оценка влияния скорости распространения волны гидравлического удара и скорости установившегося движения потока жидкости на характер протекания неустановившегося процесса и величину давления при гидравлическом ударе в напорном трубопроводе при надземной прокладке. Общие затраты на устранение аварийных ситуаций на напорных трубопроводах, особенно с учетом стоимости подготовки и очистки питьевой воды, всегда больше, чем заранее предусмотренные комплексные мероприятия, направленные на предотвращение негативных последствий возможных гидравлических ударов. **Практическая значимость:** Устранение последствий аварийных ситуаций, сопровождающихся утечкой воды, в суровых климатических условиях, при этом теплового влияния на грунты не всегда возможно избежать. Поэтому проектируя новые напорные системы и проводя реконструкцию существующих, необходимо учитывать возможные неустановившиеся процессы в напорных трубопроводах

**Ключевые слова:** Напорные трубопроводы, гидравлический удар, разрыв сплошности потока, проектирование, эксплуатация, надземная прокладка, стальные трубы, полимерные трубы.

### Введение

Напорные трубопроводы — это один из элементов систем водоснабжения и водоотведения, без устойчивой и прогнозируемой работы которых снижается их эффективность в целом.

Практика эксплуатации доказала, что наиболее рациональный способ для суровых климатических условий — это надземная прокладка напорных трубопроводов.

Надземная прокладка трубопроводов по сравнению с другими способами при строительстве позволяет снизить объемы земляных работ и сократить затраты на мероприятия, направленные на предотвращение коррозии, вызываемой воздействием грунтов. При эксплуатации трубопроводы, проложенные надземным способом, проще осматривать в профилактических целях, они практически не оказывают теплового воздей-

ствия на грунты, и при таком способе значительно уменьшается время, необходимое для устранения возможных аварийных ситуаций [1, 2].

Выбирая надземный способ прокладки трубопроводов, нельзя забывать о недостатках и особенностях их устройства, которые необходимо учитывать при проектировании. При транспортировке воды увеличиваются потери тепла, и, следовательно, требуется усиленная и дорогостоящая теплоизоляция. Однако с развитием производства современных материалов появляются новые, более эффективные, экономически обоснованные теплоизоляционные технологии [3]. Надземная прокладка предъявляет особые требования к опорам, которые не должны приводить к тепловой нагрузке на грунт. Такой тип прокладки трубопроводов рекомендуется вне территории населенных пунктов во избежание ее загромождения.

В качестве материала труб в таких условиях обычно используется сталь или полимерные материалы. Трубопроводы из чугуна, железобетона или бетона требуют сложного стыкового соединения участков труб и поэтому не рекомендуются к использованию. Муфтовые и раструбные соединения при отрицательных температурах производить затруднительно.

Надземная прокладка трубопроводов требует компенсации напряжений, возникающих в стальных и полимерных трубах при изменении наружной температуры. В случае опорожнения или заполнения трубопроводов в зимний период температура стенок труб резко изменяется и возникают наиболее опасные температурные деформации труб. Для компенсации температурных деформаций применяют прямолинейную прокладку со специальными приспособлениями и зигзагообразную прокладку на специальных опорах для самокомпенсации.

Гидравлический удар как один из видов неустановившегося процесса может возникать при

эксплуатации любой напорной трубопроводной системы. Взаимосвязь параметров гидравлических ударов и материала, из которого изготавливаются трубопроводы, рассматривается на всем протяжении истории изучения неустановившихся процессов для решения практических задач [2, 4–8].

Для подбора противоударного оборудования и выбора способа защиты насосных установок с целью предотвращения гидравлических ударов с катастрофическими последствиями необходимо еще на этапе проектирования рассчитывать величину давления, превышающего рабочее давление в различных точках напорного трубопровода, скорости движения воды при волновом процессе и определять места и величину возникновения вакуумметрического давления в системе. Большинство современных методик расчета основывается на численном методе с использованием «метода характеристик» [7–11].

Трубопроводные системы из стальных труб в среднем служат около 25–30 лет. Системы транспортировки воды, введенные в эксплуатацию при освоении территорий России в прошлом веке, постепенно приходят в полную негодность и требуют соответствующей реконструкции [12].

Актуальность данного исследования заключается в том, что существует потребность в реконструкции и развитии напорных систем, проложенных надземным способом. В современных условиях есть возможность выбирать трассу водовода, материал труб, способ их соединения, противоударное оборудование на основе всестороннего расчета с учетом возможности возникновения гидравлического удара.

Целью исследования было установить факторы, увеличивающие риск возникновения гидравлических ударов в напорных трубопроводах при надземной прокладке. При проведении исследования решались следующие задачи:

- анализировалось влияние материала труб на скорость распространения фронта волны гидравлического удара;
- исследовалось влияние толщины стенки стальной трубы на величину скорости ударной волны и величину максимального давления по всей длине при гидравлическом ударе;
- определялись параметры гидравлического удара при различных начальных скоростях движения жидкости на основе современных расчетных методов;
- приведены пути снижения рисков возникновения разрушительных неустановившихся процессов в трубопроводах при надземной прокладке.

## Методы и материалы

Предметом исследования являлся гидравлический удар в напорных трубопроводах при надземной прокладке.

Для решения поставленных задач и достижения конечной цели работы последовательно применялись теоретический, общетеchnический анализ и синтез, наблюдение и моделирование.

В работе проводилась оценка воздействия скорости распространения ударной волны, начальной скорости движения жидкости и профиля прокладки на возможность возникновения разрывов сплошности потока жидкости в процессе гидравлического удара в напорных трубопроводах.

Неустановившиеся процессы движения жидкости моделировались в стальном трубопроводе с утолщенными стенками и внутренним диаметром 82 мм [6]. Прокладка водовода осуществлялась надземная на опорах, а соединение участков труб было выполнено на сварке, арматура монтировалась с помощью фланцев. Общая протяженность трубопровода составила 171 метр, а разность высот равномерного подъема от начальной до конечной точки не превысила 41 метр. При гидравлическом ударе, вызванном резким пере-

крытием задвижки в течение 0,05 с, величина скорости распространения ударной волны составила 1250 м/с, максимальная величина вакуумметрического давления не превысила 8 м вод. ст.

Метод анализа бесконечно малых величин и метод характеристик для одномерного волнового уравнения выбраны как основа для разработанной расчетной методики параметров гидравлического удара с достаточной для решения практических задач точностью.

## Результаты исследования

В напорных трубах при гидравлическом ударе возникает фронт распространения ударной волны, скорость которого достигает наибольших величин в стальных трубах по сравнению с другими материалами труб. Большая скорость распространения волнового процесса может способствовать образованию разрывов сплошности потока жидкости у регулирующего органа (задвижки, насоса, обратного клапана и других), а также на участках изменения уклона водовода в возвышенных точках профиля. Разрыв сплошности потока происходит вследствие понижения давления в трубопроводе ниже атмосферного до вакуумметрического. Сначала поток жидкости отходит от места разрыва сплошности потока, а затем движется в обратном направлении с возрастающей скоростью, что приводит к схлопыванию разрыва. Вследствие интерференции волн происходит возрастание максимального ударного давления, которое по величине превосходит рабочее давление при установившемся процессе.

При расчетах на гидравлический удар важной характеристикой процесса является скорость распространения фронта ударной волны  $c$ , м/с. Ее величину можно определить по формуле Д. Кортевега, предложенной для использования основоположником теории гидравлического удара Н. Е. Жуковским [9]:

ТАБЛИЦА 1. Значение скорости распространения фронта ударной волны в стальных трубах с учетом отношения наружного диаметра трубы  $D_n$  к толщине стенки  $s$ 

| Скорость распространения фронта ударной волны $c$ , м/с | Виды стальных труб                        |                                             |                                             |                                           |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                                         | особотонкостенные<br>$\frac{D_n}{s} > 40$ | тонкостенные<br>$\frac{D_n}{s} = 12,5 : 40$ | толстостенные<br>$\frac{D_n}{s} = 6 : 12,5$ | особотолстостенные<br>$\frac{D_n}{s} < 6$ |
|                                                         | 926,3–1219,0                              | 1221,5–1365,1                               | 1365,7–1410,5                               | 1407,9–1419,7                             |

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E \cdot D}{E_D \cdot s}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{E \cdot D}{E_D \cdot s}}}, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль объемной упругости перекачиваемой жидкости, Па; для воды при атмосферном давлении и температуре до 20 °С,  $E = 206 \cdot 10^7$  Па;

$\rho$  — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$D$  — внутренний диаметр трубопровода, мм;

$E_D$  — модуль упругой деформации материала труб, Па; для стали  $E_D = 206 \cdot 10^9$  Па;

$s$  — толщина стенки трубопровода, мм.

Согласно ГОСТ 8734—75 [13] в зависимости от отношения диаметра к толщине стенки трубы различают: особотолстостенные, толстостенные, тонкостенные и особотонкостенные. На первый взгляд, кажется, что чем больше толщина стенки трубы  $s$ , тем лучше трубопровод из таких труб противостоит гидравлическому удару. Наряду с преимуществами (выдерживают динамические нагрузки без потери прочности длительное время, рассчитаны на большие рабочие давления) у толстостенных труб есть и недостатки (в них быстрее распространяются волны изменения давления при гидравлических ударах, и поэтому значения максимального давления при таких явлениях могут быть значительнее).

В табл. 1 приведены значения скорости распространения фронта ударной волны, рассчитанной по формуле (1) для различных видов стальных труб, выпускаемых по ГОСТ 8734—75 [13] и ГОСТ 10704—91 [14]. Эти данные показывают, что с увеличением толстостенности трубы величина  $c$  возрастает в стальных трубах почти на 50 %, при этом для толстостенных и особотолстостенных труб скорость  $c$  имеет максимальные значения и мало зависит от соотношения  $D_n/s$  (разница в значениях не превышает 5 %).

Пластмассовые трубы в целом характеризуются значительно меньшим значением модуля упругой деформации материала труб, численное значение которого зависит от вида полимерного материала и указывается производителем. Следовательно, в соответствии с формулой (1) скорость распространения ударной волны в таких трубах не превосходит 900 м/с и обычно находится в пределах от 200 до 600 м/с. При этом для надземной прокладки трубопроводов из полимерных материалов нет необходимости учитывать упругий отпор грунта, который зачастую значительно увеличивает скорость распространения ударной волны [10].

Без учета волнового характера распространения гидравлического удара при первичном рассмотрении может показаться, что такие низкие скорости распространения волны гидравлического удара способствуют снижению значений максимальных давлений в трубопроводах из полимерных материалов. В водоводах, имеющих значительный подъем от регулирующего органа с последующими точками перелома профиля маги-

страли, несмотря на низкую скорость ударной волны, могут возникать гидравлические удары с разрывами сплошности потока, которые существуют продолжительный период времени как в точках перелома, так и у регулирующего органа. Негативным последствием таких гидравлических ударов является не только появление давлений большей величины, но и значительные разрывы сплошности потока жидкости в трубопроводах. Возникновение в трубопроводах из полимерных материалов таких разрывов потока с понижением давления до вакуумметрического негативно сказывается на прочностных характеристиках самих труб и их стыковых соединений.

Проследить влияние величин скорости распространения волны гидравлического удара и начальной скорости движения жидкости при установившемся режиме на давление при гидравлическом ударе можно по формуле Н. Е. Жуковского [9]. В случае полной остановки системы и прекращения движения жидкости в трубопроводе формула имеет вид:

$$H = H_0 + \frac{c \cdot V_0}{g}, \quad (2)$$

где  $H$  — напор в процессе гидравлического удара, м;

$H_0$  — напор при установившемся движении жидкости в трубопроводе, м;

$c$  — скорость распространения волны гидравлического удара, м/с;

$V_0$  — начальная скорость движения жидкости в трубопроводе при установившемся режиме, м/с;

$g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Формула (2) не учитывает многочисленные факторы, влияющие на процесс протекания гидравлического удара, имеющего волновой характер распространения, такие как: профиль

прокладки трубопровода, время срабатывания регулирующего органа, вид установленного оборудования, изменение диаметра и материала трубопровода на различных участках сети. Методика расчета параметров неустановившегося процесса, основанная на методе характеристик, позволяет учесть эти особенности.

Воспользовавшись известными дифференциальными уравнениями неустановившегося движения [7–11] и преобразовав их с помощью метода характеристик, можно составить модель гидравлического удара, учитывающую особенности всей трубопроводной системы и позволяющую определять ее параметры в любой расчетной точке и в каждый момент времени.

Особенностью гидравлического удара в трубопроводе с восходящим продольным профилем является то, что с увеличением начальной скорости движения жидкости при установившемся режиме возрастает вероятность возникновения разрывов сплошности потока жидкости у регулирующего органа в начале водовода. При схлопывании кавитационных полостей образуются новые волны давления, которые в результате интерференции волн вызывают резкое увеличение давления. Схлопывание длительно существующих разрывов сплошности потока жидкости способствует появлению обратной скорости течения жидкости, превышающей ее начальное значение при установившемся процессе.

Данные процессы можно наглядно проследить по значениям давления, проявляющимся как в первом, так и во втором повышении давления, которые рассчитаны и сравниваются с экспериментальными данными в табл. 2.

Сопоставление экспериментальных значений и расчетных данных, полученных авторами, показывает их хорошую сходимость, так как максимальная величина погрешности составляет 12,1 % и величина средней относительной погрешности — 4,6 %.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение величины максимального давления от начальной скорости движения жидкости

| Начальная скорость движения воды, м/с | Первое повышение напора |        |                              | Второе повышение напора |        |                              |
|---------------------------------------|-------------------------|--------|------------------------------|-------------------------|--------|------------------------------|
|                                       | значения напора, м      |        | относительная погрешность, % | значения напора, м      |        | относительная погрешность, % |
|                                       | эксперимент             | расчет |                              | эксперимент             | расчет |                              |
| 0,18                                  | 65                      | 62,0   | 4,8                          | 60                      | 61,8   | 2,9                          |
| 0,36                                  | 80                      | 77,5   | 3,2                          | 66                      | 74,7   | 11,6                         |
| 0,4                                   | 90                      | 82,8   | 8,7                          | 79                      | 78,1   | 1,4                          |
| 0,5                                   | 116                     | 116,9  | 0,8                          | 90                      | 85,8   | 5,0                          |
| 0,6                                   | 132                     | 134,2  | 1,6                          | 105                     | 100,8  | 4,2                          |
| 0,8                                   | 160                     | 172,8  | 7,4                          | 135                     | 134,6  | 0,3                          |
| 1,0                                   | 182                     | 191,7  | 5,1                          | 170                     | 163,3  | 4,1                          |
| 1,06                                  | 165                     | 188,4  | 12,1                         | 168                     | 170,6  | 1,5                          |
| 1,2                                   | 175                     | 195,5  | 10,5                         | 210                     | 218,8  | 4,0                          |
| 1,25                                  | 200                     | 207,9  | 3,8                          | 215                     | 217,4  | 1,1                          |
| 1,4                                   | 218                     | 235,1  | 7,3                          | 215                     | 211,5  | 1,7                          |
| 1,5                                   | 220                     | 238,2  | 7,6                          | 245                     | 217,0  | 12,0                         |
| 1,63                                  | 247                     | 247,6  | 0,3                          | 250                     | 247,2  | 1,1                          |
| 1,7                                   | 230                     | 250,0  | 8                            | 250                     | 250,0  | 0                            |
| 1,82                                  | 265                     | 269,7  | 1,7                          | 230                     | 255,3  | 9,9                          |
| 2,0                                   | 285                     | 292,0  | 2,4                          | 290                     | 289,6  | 0,1                          |

Величина начальной скорости движения жидкости влияет не только на возрастание величины ударного давления. Можно проследить по значениям, представленным в табл. 2, что с увеличением численного значения начальной скорости движения меняется и период гидравлического удара, в котором наблюдаются максимальные значения ударного давления. Для начальных скоростей более 1 м/с характерно появление максимального ударного давления во второй фазе гидравлического удара.

Диаграммы на рис. 1 и 2 наглядно показывают изменение давления во времени в процессе гидравлического удара, вызываемого быстрым закрытием задвижки в начале трубопровода по направлению начального движения воды. В зависимости от начальной скорости движения воды меняется и величина максимального ударного давления, и характер протекания всего процесса гидроудара в целом. Например, на рис. 1 ( $V_0 = 0,6$  м/с) и на опытной диаграмме, и на расчетном графике отчет-

ливо видна картина падения давления у регулирующего органа ниже атмосферного.

В первой фазе гидравлического удара на опытной диаграмме можно проследить высокочастотные колебания давления, что свидетельствует о возникновении по всей длине потока мелких кавитационных пузырьков. Однако само понижение давления ниже атмосферного длится не более 0,3 с, значит, крупных кавитационных пустот (разрывов сплошности потока) не образуется. Расчетная диаграмма описывает кратковременное понижение давления с образованием небольших кавитационных пустот.

Диаграммы на рис. 2 при начальной скорости около  $V_0 = 1,1$  м/с отличаются от рассмотренных выше большей продолжительностью существования в трубопроводе давления ниже атмосферного.

В следующую фазу гидравлического удара давление возрастает быстрее и держится у максимальных величин более продолжительное время. Подобный характер изменения давления свиде-

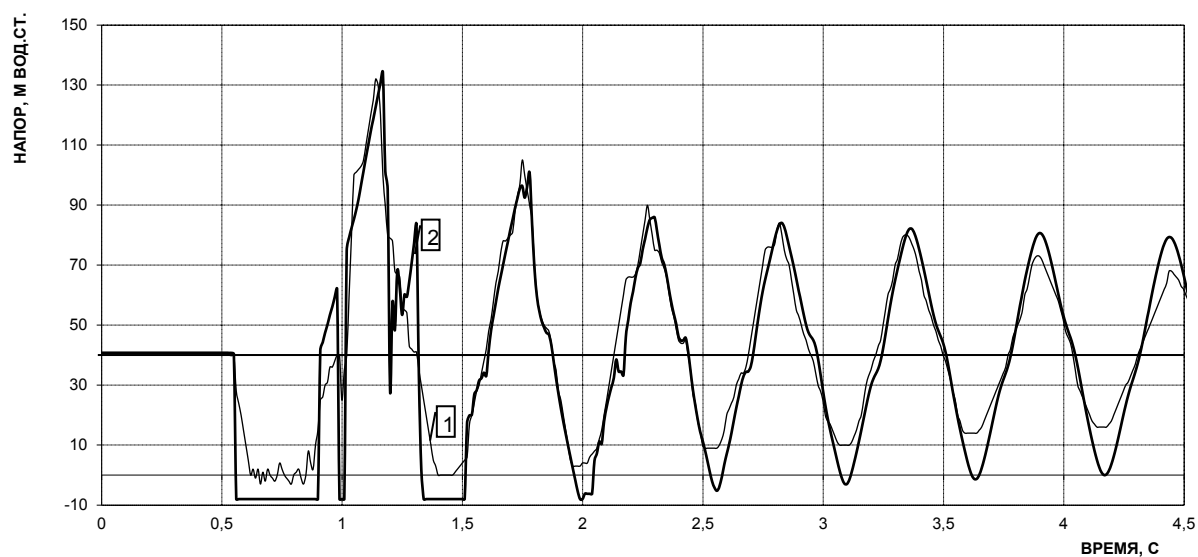


Рис. 1. Графики изменения давления у задвижки при  $V_0 = 0,6$  м/с:  
1 — график, построенный по экспериментальным данным [6];  
2 — график, полученный по расчетным значениям

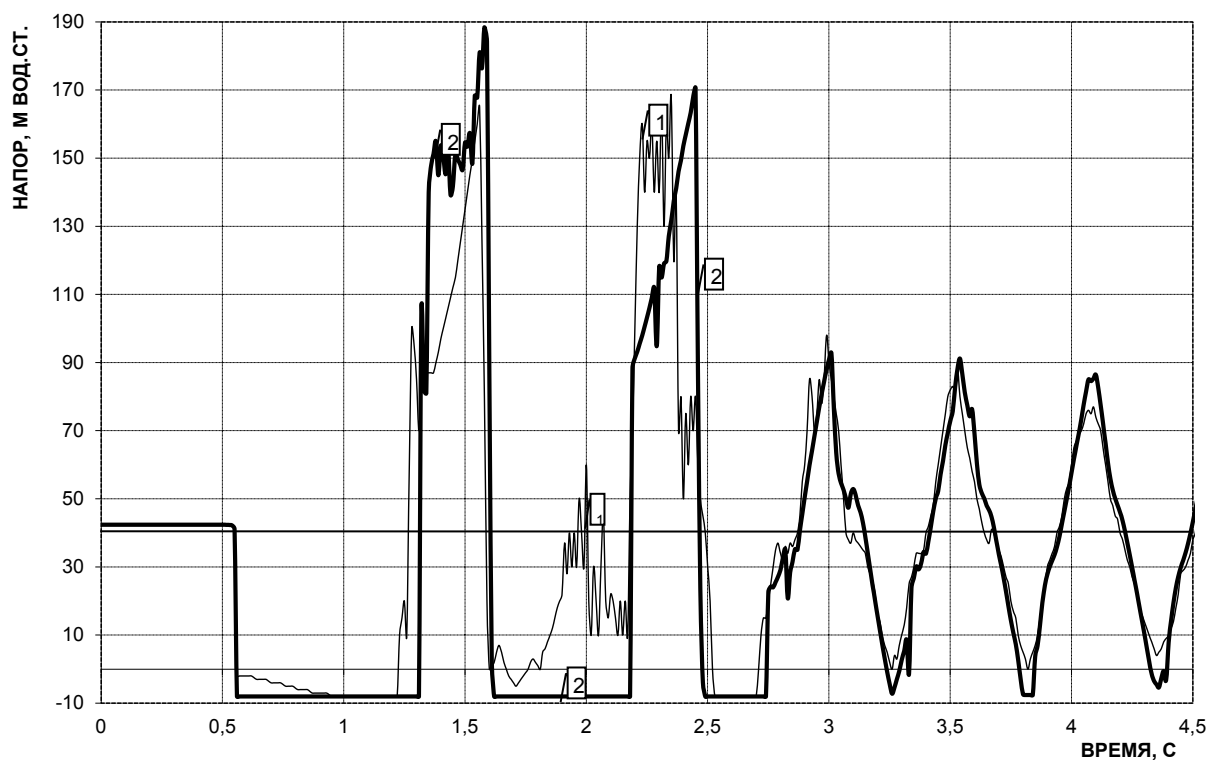


Рис. 2. Графики изменения давления у задвижки при  $V_0 = 1,1$  м/с:  
1 — график, построенный по экспериментальным данным [6];  
2 — график, полученный по расчетным значениям



тельствует о возникновении существенного разрыва сплошности потока у задвижки при первом снижении давления. В последующие фазы происходит затухание процесса, которое сопровождается уменьшением скорости движения жидкости, поэтому снижение давления ниже атмосферного в последующих фазах гидравлического удара приводит в первую очередь к образованию мелких кавитационных полостей по всему трубопроводу. Разрывы сплошности потока жидкости незначительны и проявляются кратковременно.

Использование данной методики расчета позволяет учесть факторы, влияющие на процесс гидравлического удара, и построить диаграммы изменения давления в любой точке напорного трубопровода.

Для снижения вероятности возникновения катастрофических проявлений гидравлического удара необходимо в первую очередь провести полноценный расчет всей напорной системы. На основе полученных результатов расчета и диаграмм изменения давления в различных характерных точках сети требуется при необходимости подбирать мероприятия и оборудование для снижения последствий гидравлических ударов. Затем желательно провести поверочный расчет моделируемого неустановившегося процесса с учетом противоударных мероприятий и оценить эффективность принятых решений.

## Обсуждение

В современных условиях при надземной прокладке напорных трубопроводов для заказчиков в приоритете остаются стальные трубы. При проектировании и реконструкции необходимо учитывать, что увеличение толщины стенки трубы не снижает вероятность возникновения гидравлических ударов. Однако, если открыть соответствующий типу производства стальных труб ГОСТ, можно увидеть, что теоретическая масса 1 м трубы для одного и того же диаметра, но разной

толщины стенки отличается в разы. Очевидно, что стоимость труб с увеличением толщины стенки также значительно возрастает, и более тяжелые трубы требуют усиленных опор при надземной прокладке. С точки зрения противодействия негативным последствиям гидравлического удара в водопроводных напорных трубах применение особотолстостенных или толстостенных труб оправдано только рабочим давлением установившегося движения жидкости, требующим использования таких высокопрочных труб.

Скорость установившегося движения потока жидкости, как видно из экспериментов и расчетных данных, напрямую влияет на процесс протекания гидравлического удара. При эксплуатации трубопроводов из разных материалов известно, что со временем внутренний диаметр труб уменьшается за счет наличия отложений в трубах. Толщина внутренних отложений труб, находящихся в эксплуатации более десяти лет, достигает больших значений. С учетом подогрева транспортируемой воды при низких температурах окружающего воздуха процесс нарастания отложений внутри трубы идет более активно. Фактическая скорость потока за счет сужения поперечного сечения возрастает на 30–50 % [15].

Для снижения рисков возникновения гидравлического удара в напорных трубопроводах при надземной прокладке необходимо проводить расчет трубопровода на возможность возникновения неустановившегося процесса в широком диапазоне скоростей движения потока воды при установившемся режиме. В соответствии с результатами расчета, в случае возникновения при моделировании процесса гидроудара значений давления, многократно превышающих величину давления при установившемся процессе, можно даже рассмотреть изменение трассы прокладки системы трубопроводов для исключения участков с резким подъемом.

Необходимо направлять усилия на предотвращение появления гидравлического удара еще на

стадии проектирования напорной системы, а не бороться с его последствиями, особенно в сложных климатических условиях. Изменение трассы трубопровода, снижение скорости движения воды при установившемся процессе, приводящее к увеличению диаметров трубопроводов, — это дорогостоящие мероприятия, но долгосрочный эффект надежности и безаварийной работы системы в целом более ценен.

Противоударная защита должна основываться на расчетных значениях давлений в трубопроводе и включать в себя разносторонние мероприятия для предотвращения не только разрывов трубопроводов, но и длительных снижений давления ниже атмосферного, исключаящих развитие обратных скоростей движения воды значительной величины.

## Заключение

Проведенные расчеты показывают, что увеличение толщины стенки стальной трубы не приводит к снижению значения скорости распространения фронта ударной волны и, следовательно, не ведет к снижению величины возникающего максимального давления при гидравлических ударах. С другой стороны, низкие значения скоростей распространения волны давления в трубах из полимерных материалов не гарантируют невозможности возникновения ударов, сопровождающихся разрывами сплошности потока жидкости, которые также сопровождаются высокими величинами ударного давления.

Снижение скорости движения жидкости при установившемся режиме в напорной системе и определение оптимального диапазона скоростей для проектируемого трубопровода способствуют снижению риска возникновения катастрофических проявлений возможного гидравлического удара.

Моделирование процесса с использованием метода характеристик позволяет проводить

расчеты параметров гидравлического удара в напорном трубопроводе при надземной прокладке с достаточной точностью, тем самым способствуя выбору наиболее эффективных и достаточных мероприятий по снижению рисков возникновения разрушительных неустановившихся процессов.

## 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. 24(4). Pp. 71–78. — DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
2. Дикаревский В. С. Напорные водоводы железнодорожного водоснабжения / В.С. Дикаревский, И. И. Краснянский. — М.: Транспорт, 1978. — 360 с.
3. Petrova T. M. Geotechnical problems of transport construction and their solutions / T. M. Petrova, E. Y. Chistyakov // *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. — 2019. — Pp. 250–253. — DOI: 10.1201/9780429058882-49.
4. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. — М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. — 104 с.
5. Мошнин Л. Ф. Расчеты гидравлического удара / Л. Ф. Мошнин, Е. Т. Тимофеева. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. — 200 с.
6. Смирнов Д. Н. Гидравлический удар в напорных водоводах / Д. Н. Смирнов, Л. Б. Зубов. — М.: Стройиздат, 1975. — 122 с.
7. Дикаревский В. С. Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения / В. С. Дикаревский, О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // *Вестник РААСН*. — 2004. — Вып. 8. — С. 152–156.
8. Людеке Х.-Й. Гидроудар: причины, анализ и способы предотвращения / Х.-Й. Людеке, Б. Котэ, К. Паули //

Водоснабжение и санитарная техника. — 2015. — № 8. — С. 62–69.

9. Капинос О. Г. Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 116–126.

10. Капинос О. Г. Последствия гидравлических ударов, сопровождающихся разрывами сплошности потока жидкости / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2011. — Вып. 3(28). — С. 167–176.

11. Капинос О. Г. Влияние выбранного материала труб на величину давления в трубопроводе при возможном гидравлическом ударе / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2008. — № 2(15). — С. 112–119.

12. Терехов Л. Д. 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. Сборник докладов участников XVII Международной

научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева. — М., 2022. — С. 54–61.

13. ГОСТ 8734—75. Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. — М., 1996. — 20 с.

14. ГОСТ 10704—91. Трубы стальные электросварные прямошовные. — М., 2007. — 12 с.

15. Продоус О. А. Техническое регулирование значений гидравлических параметров неновых металлических труб для продления периода их использования / О. А. Продоус, Л. Д. Терехов, П. П. Якубчик и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 3. — С. 421–427.

Дата поступления: 07.02.2023

Решение о публикации: 01.03.2023

#### Контактная информация:

КАПИНОС Ольга Геннадьевна — канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; [olk1975@mail.ru](mailto:olk1975@mail.ru)

ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна — канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; [tvardovskaya@pgups.ru](mailto:tvardovskaya@pgups.ru)

## Hydraulic Hits in Penstocks with Above-Ground Laying

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya

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

**For citation:** Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. Hydraulic Hits in Penstocks with Above-Ground Laying // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 79–90. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90

### Summary

**Purpose:** To determine the factors having the biggest impact on the risk of water hammer occurrence in above-ground laying of pipeline which's rational for severe climate conditions. To define the velocities of hammer wave front propagation in steel pipes for their different types and to compare with the values for polythene pipes. To pursue the calculation of parameters of possible water hammer, depending on pipeline wall thickness. **Methods:** Method of characteristics, used for solving differential equations of liquid unsteady motion, laid at the basis of calculation model for flow parameter definition at water hammer occurrence. **Results:** On the basis of calculations carried out in the article, the diagrams of pressure changes

in pressure pipeline, made of steel pipes. are analyzed. Impact assessment of water hammer wave speed propagation and of liquid flow steady-state motion speed on unsteady process flow character and pressure value at water hammer in pressure pipeline in above-ground laying is pursued. Common expenditures on the elimination of emergency situations on pressure pipelines, especially given the cost of drinking water preparation and purification, are always bigger than preliminary provided complex measures aimed at the elimination of possible water hammer negative consequences. **Practical significance:** Above-ground laying way of pipelines dictates the use of pipes from particular materials. Steel and polythene pipes, applied in this case, demonstrate special characteristics which should be considered at the projection of appearance possibility of water hit and its consequences. Elimination of emergency situation consequences, accompanied by water leakage, is complicated especially in severe climate conditions, meanwhile, thermal impact on soils is not always avoidable. Therefore, when projecting new pressure systems and reconstructing existing ones it is necessary to take into account possible unsteady processes in pressure pipelines.

**Keywords:** pressure pipelines, water hammer, flow continuity gap, projection, operation, severe climate conditions, above-ground laying, steel pipes, polymer pipes.

## References

1. Terekhov L. D., Mayny S. B., Chernikov N. A. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter. *Water and Ecology*, 2019, Iss. 24(4), pp. 71–78. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
2. Dikarevskij V. S., Krasnyansky I. I. *Napornye vodovody zheleznodorozhnogo vodosnabzheniya* [Pressure water pipelines for railway water supply]. Moscow: Transport Publ., 1978, 360 p. (In Russian)
3. Petrova T. M., Chistyakov E. Y. Geotechnical problems of transport construction and their solutions. *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*, 2019, pp. 250–253. DOI: 10.1201/9780429058882-49.
4. Zhukovskij N. E. *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnyh trubah* [On hydraulic shock in water pipes]. M.-L.: GITTL Publ., 1949, 104 p. (In Russian)
5. Moshnin L. F., Timofeeva E. T. *Raschety gidravlicheskogo udara* [Calculations of hydraulic shock]. M.; L.: Gosenergoizdat, 1952, 200 p. (In Russian)
6. Smirnov D. N., Zubov L. B. *Gidravlicheskiy udar v napornyh vodovodah* [Hydraulic shock in pressure conduits]. Moscow: Strojizdat Publ., 1975, 122 p. (In Russian)
7. Dikarevskij V. S., Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Gidravlicheskiy udar v napornyh truboprovodah vodootvedeniya* [Hydraulic shock in pressure sewerage pipelines]. *Vestnik RAASN* [Vestnik RAASN]. 2004, vol. 8, pp. 152–156. (In Russian)
8. Lyudeke H.-J., Kote B., Pauli K. *Gidroudary: prichiny, analiz i sposoby predotvrashcheniya* [Water hammer: causes, analysis and ways to prevent]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering]. 2015, Iss. 8, pp. 62–69. (In Russian)
9. Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Uchet razryvov sploshnosti potoka pri gidravlicheskikh udarakh na etape proektirovaniya napornykh truboprovodov iz polimernykh materialov* [Accounting for Flow Discontinuities While Water Hammers at Engineering Stage of Pressure Pipelines Made of Polymeric Materials]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 1, pp. 116–126. (In Russian)
10. Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Posledstviya gidravlicheskikh udarov, soprovozhdayushchihsya razryvami sploshnosti potoka zhidkosti* [Effects/Consequences of Water Hammer Accompanied by the Interruption of FluidFlow Discontinuity]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2011, Iss. 3(28), pp. 167–176. (In Russian)
11. Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V. *Vliyanie vybrannogo materiala trub na velichinu davleniya v truboprovode pri vozmozhnom gidravlicheskom udare* [Influence of the Selected Pipe Material on the Pressure Value in a Pipeline at a Possible

Hydraulic Hammer]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2008, Iss. 2(15), pp. 112–119. (In Russian)

12. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V., Fedorchuk A. V. et al. Problemy iznoshennykh truboprovodov Dal'nego Vostoka Rossii i puti ikh vosstanovleniya [Problems of worn-out pipelines of the Russian Far East and ways of their restoration]. *Yakovlevskie chteniya — 2022: Sistemy vodosnabzheniya i vodootvedeniya. Sovremennye problemy i resheniya. Sbornik dokladov uchastnikov XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati akademika RAN S. V. Yakovleva* [Yakovlev readings — 2022: Water supply and sanitation systems. Modern problems and solutions. Collection of reports of participants of the XVII International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S. V. Yakovlev]. Moscow, 2022. pp. 54–61. (In Russian)

13. GOST 8734—75. *Truby stal'nye besshovnye kholodnodeformirovannye* [GOST 8734—75. Seamless cold-deformed steel pipes]. Moscow, 1996, 20 p. (In Russian)

14. GOST 10704—91. *Truby stal'nye elektrosvarnye pryamoshovnye* [GOST 10704—91. Electric-welded steel straight-seamed pipes]. Moscow, 2007, 12 p. (In Russian)

15. Prodous O. A., Terekhov L. D., Yakubchik P. P. et al. Tekhnicheskoe regulirovanie znacheniy gidravlicheskih parametrov nenovykh metallicheskih trub dlya prodleniya perioda ikh ispol'zovaniya [Technical regulation of values of hydraulic parameters of non-wood metal pipes to extend their period of use]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, Iss. 3, pp. 421–427. (In Russian)

Received: February 07, 2023

Accepted: March 01, 2023

**Author's information:**

Olga G. KAPINOS — PhD in Engineering,  
Associate Professor, Department  
of “Water Supply, Sewerage and Hydraulics”;  
olk1975@mail.ru

Nadezhda V. TVARDOVSKAYA —  
PhD in Engineering, Associate Professor,  
Head of the Department  
of “Water Supply, Sewerage and Hydraulics”;  
tvardovskaya@pgups.ru

УДК 628:614.82

## Факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов

Е. В. Постнова, Е. В. Рунев

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

**Для цитирования:** Постнова Е. В., Рунев Е. В. Факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 91–100. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-91-100

### Аннотация

**Цель:** Построить факторную модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов по результатам лабораторных испытаний, проведенных с учетом амплитудно-частотных характеристик колебательного процесса действующего трубопровода, полученных при проведении натурных испытаний на железнодорожной станции. На основании факторной модели определить наиболее значимые факторы, влияющие на надежность трубопроводов в условиях действия вибродинамической нагрузки и предложить способы повышения их безотказности. **Методы:** Для проведения лабораторных испытаний трубопровода на надежность при воздействии на него напряжений знакопостоянного цикла применялся план дробного факторного эксперимента типа  $2^{5-2}$ . Эксперименты проводились на испытательном стенде с пульсирующим цилиндром типа ПЦ с максимальной нагрузкой 200 кН. Напряжения на испытываемый трубопровод подавались с пультов управления статической (от грунта) и динамической (от подвижного состава) нагрузками. Форма импульса — синусоидальная, наиболее близкая к натурной, частота цикла — 300 ц/мин. Коэффициенты уравнения регрессии вычислялись на ЭВМ по программе множественной линейной корреляции. Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась с помощью критерия Стьюдента. Для проверки адекватности модели экспериментальным данным применялся критерий Фишера. Адекватность уравнения регрессии физике явления проверялась при помощи критерия Стьюдента. **Результаты:** Проведенные испытания трубопровода с применением дробного факторного эксперимента типа  $2^{5-2}$  позволили построить факторную модель исследуемого процесса в виде полинома первой степени. Установлено, что основными факторами, влияющими на надежность трубопровода в условиях действия вибродинамической нагрузки, являются поездная нагрузка, амплитуда колебаний трубопровода и глубина его заложения. Частота колебаний трубопровода не оказывает существенного влияния на надежность трубопровода. Однако из уравнения регрессии следует, что частота колебаний трубопровода зависит от его диаметра. **Практическая значимость:** Получено уравнение линейной регрессии, преобразованное путем перехода от кодированных значений факторов к натуральным значениям, которое можно использовать в практических целях для определения интенсивности отказов и продолжительности эксплуатации железнодорожных трубопроводов между отказами.

**Ключевые слова:** Факторная модель влияния, планирование эксперимента, матрица факторов, амплитудно-частотные характеристики колебательного процесса трубопровода, полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент.

### Введение

Проблема надежности трубопроводов в условиях воздействия на них вибродинамической нагрузки имеет большое значение в современных

условиях эксплуатации. Повреждения на таких трубопроводах могут вызвать размыв железнодорожного полотна и, как следствие, нарушить безопасность движения поездов.

Проведенные испытания на действующем железнодорожном трубопроводе подтвердили влияние вибродинамической нагрузки подвижного состава на его надежность [1]. Обработка и анализ записей колебательного процесса испытательного участка трубопровода при движении подвижного состава [2] позволили выявить основные характеристики случайных процессов: корреляционную функцию и спектральную плотность. Эти характеристики совместно определяют внутренние свойства и структуру колебательного процесса: корреляционная функция — во временной области, спектральная плотность — в частотной области [3].

После проведения натурных испытаний на железнодорожной станции были получены амплитудно-частотные характеристики колебаний трубопровода, давление от поездной нагрузки, давление от грунта, это позволило в лабораторных условиях смоделировать процесс вибродинамического воздействия подвижного состава на состояние железнодорожных трубопроводов.

По результатам лабораторных испытаний была построена факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов, связывающая величину отклика  $Y$  и факторы  $\{X_i\}_{i=1}^n$ .

Следует отметить, что в литературных источниках в настоящее время отсутствуют данные по моделированию данного процесса с использованием факторов, характерных для железнодорожного транспорта: поездной нагрузки, частоты и амплитуды колебаний трубопроводов при движении подвижного состава.

Уравнение линейной регрессии с оценками его коэффициентов имеет практическую значимость. Преобразованное уравнение позволяет определить интенсивность отказов и продолжительность эксплуатации трубопроводов между отказами, это предотвратит аварии на железнодорожном транспорте, связанные с повреждениями труб.

## Планирование эксперимента и матрица факторов

Получение факторной модели (идентификации) процесса испытаний трубопровода в условиях влияния вибродинамической нагрузки требует выполнения следующих действий:

- планирование эксперимента;
- проведение эксперимента (испытаний трубопровода на надежность);
- построение факторной модели эксперимента;
- проверка статистической значимости коэффициентов регрессии;
- проверка адекватности факторной модели эксперименту;
- проверка адекватности факторной модели физике явления.

Планирование эксперимента позволяет: минимизировать число испытаний; одновременно варьировать все переменные, определяющие процесс по специальному плану — матрице эксперимента, а также применить аппарат множественной линейной регрессии, отражающей сущность исследуемого процесса [4].

При планировании эксперимента прежде всего следует выбрать факторы, влияющие на надежность трубопроводов в условиях действия вибродинамической нагрузки. Эти факторы должны отвечать требованиям управляемости, независимости, однозначности и совместимости.

Выбор факторов влияния основывался на результатах, полученных после проведения испытаний на действующем железнодорожном трубопроводе. Выбраны следующие факторы, влияющие на надежность трубопроводов в условиях действия вибродинамической нагрузки: поездная нагрузка/давление от поездной нагрузки; частота колебаний трубопровода; амплитуда колебаний трубопровода; диаметр трубопровода; глубина заложения трубопровода/давление от грунта.

Для проведения лабораторных испытаний трубопровода предлагается применить полный



факторный эксперимент (ПФЭ), обладающий ортогональной матрицей факторов  $X$ . ПФЭ реализует все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых и управляемых факторов. План ПФЭ на уровнях  $(-1$  и  $+1)$  при числе факторов  $n$  обозначается  $2^n$ . Количество испытаний в ПФЭ значительно превосходит число определяемых коэффициентов линейной модели, т. е. ПФЭ обладает избыточностью испытаний. Это проявляется при увеличении числа факторов  $n$ , так как количество вариантов варьирования для ПФЭ растет по показательному закону. В рассматриваемом эксперименте при числе факторов  $n = 5$  необходимо провести 32 испытания [5].

При этом каждый фактор имеет три уровня, на которых он будет варьироваться в эксперименте: нижний  $-1$ ; верхний  $+1$ ; основной в центре области варьирования  $0$ .

Выбор основного уровня и интервала варьирования перечисленных факторов проводился с использованием результатов натурных испытаний, проведенных на действующем железнодорожном трубопроводе [6–8].

Поездная нагрузка, действующая на трубопровод в условиях железнодорожной станции, вычисляется по формуле:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^3 q_i}{l_{\text{ш}} \cdot \sum_{i=1}^3 l_i}, \text{ кН/м}^2, \quad (1)$$

где  $q_i$  — нагрузка на ось колесной пары локомотива: 200 кН (ТЭМ-2), 220 кН (ЗТЭ10М), 210 кН (ТЭП-70), 125 кН (ЭР-2);

$l_{\text{ш}} = 2700$  мм длина шпалы;

$l_i$  — расстояние между колесными парами тележки локомотива: 2100 мм (ТЭМ-2), 1850 мм (ЗТЭ10М), 2200 мм (ТЭП-70), 2600 мм (ЭР-2) [9].

Под влиянием собственного веса грунта и поездной нагрузки в теле трубопровода возникают напряжения:

$$\sigma = \sigma_{\gamma} + \sigma_{\Pi}, \text{ кПа} \quad (2)$$

Напряжения в теле трубопровода, вызванные собственным весом грунта, определяются:

$$\sigma_{\gamma} = \gamma \cdot H, \text{ кПа}, \quad (3)$$

где  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup> объемная масса грунта (суглинки);

$H$  — глубина заложения трубопровода, м.

Напряжения в теле трубопровода, вызванные поездной нагрузкой, определяются [6]:

$$\sigma_{\Pi} = -\frac{P}{\pi} \cdot \left[ \beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 - \beta_2 - \frac{1}{2} \sin 2\beta_2 \right], \quad (4)$$

где  $\sigma_{\Pi}$  — напряжение в теле трубы от поездной нагрузки, кПа;

$P$  — поездная нагрузка, кН/м<sup>2</sup>;

$\beta_1$  и  $\beta_2$  — углы, отсчитываемые от вертикалей, ограничивающих нагрузку, в градусах.

В табл. 1 приведены значения частот и амплитуд колебательного процесса, полученные в результате натурных испытаний, проведенных на действующем железнодорожном трубопроводе при движении различных серий локомотивов [1].

Полученные уровни факторов и их интервалы варьирования приведены в табл. 2.

Для практических задач построения факторной модели, при  $n \geq 5$  целесообразнее использовать дробный факторный эксперимент (ДФЭ) [10]. При ДФЭ реализуется часть (дробная реплика) ПФЭ, т. е. уменьшение числа испытаний за счет введения дробных реплик, что не ведет к изменению свойств плана ПФЭ, т. е. матрица планирования  $X$  остается ортогональной.

В начале строится ПФЭ для меньшего числа факторов  $n = 3$ . Затем оставшиеся факторы  $X_4$

ТАБЛИЦА 1. Амплитудно-частотные характеристики колебательного процесса трубопровода при движении различных серий локомотивов

| Серия локомотивов            | Частотный диапазон колебаний, $\omega$ , Гц |                |        | Значения амплитуд колебаний, $A$ , мк |                      |
|------------------------------|---------------------------------------------|----------------|--------|---------------------------------------|----------------------|
|                              | вертикальных                                | горизонтальных | осевых | трубы                                 | стыкового соединения |
| Маневровый ТЭМ-2             | 80–100                                      | 40–70          | 5–10   | 100                                   | 270                  |
| Поездной грузовой 2ТЭ10М     | 80–90                                       | 30–60          | 5–10   | 42                                    | 125                  |
| Поездной пассажирский ТЭП-70 | 70–80                                       | 30–50          | 4–6    | 33                                    | 106                  |
| Электропоезд ЭР-2            | 60–70                                       | 20–40          | 3–5    | 12                                    | 30                   |

ТАБЛИЦА 2. Уровни факторов и их интервалы варьирования

| Кодированное обозначение факторов | Факторы                                                                                       | Уровни факторов  |                  |                  | Интервал варьирования |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
|                                   |                                                                                               | –1               | 0                | 1                |                       |
| $X_1$                             | Поездная нагрузка, $P$ , кН/м <sup>2</sup><br>Напряжение от поездной нагрузки, $\sigma$ , кПа | $\frac{30}{20}$  | $\frac{50}{40}$  | $\frac{70}{60}$  | $\frac{20}{20}$       |
| $X_2$                             | Частота колебаний трубопровода, $\omega$ , Гц                                                 | 30               | 50               | 70               | 20                    |
| $X_3$                             | Амплитуда колебаний трубопровода, $A$ , мк                                                    | 100              | 200              | 300              | 100                   |
| $X_4$                             | Диаметр трубопровода, $D$ , мм                                                                | 100              | 200              | 300              | 100                   |
| $X_5$                             | Глубина заложения трубы, $H$ , м<br>Напряжение от грунта, $\sigma$ , кПа                      | $\frac{1,5}{30}$ | $\frac{2,0}{40}$ | $\frac{2,5}{50}$ | $\frac{0,5}{10}$      |

ТАБЛИЦА 3. Матрица планирования ДФЭ типа  $2^{5-2}$ 

| № испытаний | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_1 \cdot X_4$ | $X_2 \cdot X_4$ | $X_3 \cdot X_4$ | Отклики<br>$Y_i$ , млн циклов |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| 1           | +     | –     | –     | –     | +     | +     | –               | –               | –               | 13,3                          |
| 2           | +     | +     | –     | –     | –     | –     | –               | +               | +               | 7,9                           |
| 3           | +     | –     | +     | –     | –     | +     | +               | –               | +               | 8,8                           |
| 4           | +     | –     | –     | +     | +     | –     | –               | –               | +               | 14,2                          |
| 5           | +     | +     | +     | –     | +     | –     | +               | +               | –               | 12,7                          |
| 6           | +     | +     | –     | +     | –     | +     | –               | +               | –               | 18,4                          |
| 7           | +     | –     | +     | +     | –     | –     | +               | –               | –               | 9,8                           |
| 8           | +     | +     | +     | +     | +     | +     | +               | +               | +               | 20,1                          |

и  $X_5$  заменяются генерирующими соотношениями:  $X_4 = X_1 \cdot X_2$ ;  $X_5 = X_1 \cdot X_3$ , которые служат для построения дробной реплики. Полученный план ДФЭ обозначается  $2^{5-2}$ , для его реализации необходимо провести 8 испытаний.

В ортогональном планировании допускаются следующие сочетания факторов:  $X_1 \cdot X_4$  — поездной нагрузки и диаметра трубопровода;

$X_2 \cdot X_4$  — частоты колебаний и диаметра трубопровода;  $X_3 \cdot X_4$  — амплитуды колебаний и диаметра трубопровода. Матрица планирования ДФЭ типа  $2^{5-2}$  представлена в табл. 3. Под откликом  $Y$  принималось число циклов, наработанных до резкого падения давления воды в испытываемом трубопроводе, которое фиксировалось манометром.

### Построение факторной модели

Информация, полученная при реализации матрицы планирования ДФЭ по испытанию трубопровода на надежность в условиях действия вибродинамической нагрузки, позволяет построить факторную модель исследуемого процесса. Модель эксперимента описывается уравнением регрессии, связывающим отклик  $Y$  с факторами  $X_j$ :

$$Y = \beta \cdot X + \varepsilon, \quad (5)$$

где  $X = (1, X_1, \dots, X_5)$  матрица факторов;

$\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_5)$  — вектор параметров линейной регрессионной модели;

$\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$  — ошибки измерений (случайная помеха или белый шум). Согласно теореме Гаусса — Маркова белый шум удовлетворяет условиям:  $E\varepsilon = 0$ ;  $E(\varepsilon_i \cdot \varepsilon_k) = 0$ .

Представление функции регрессии  $E(Y|X) = \beta \cdot X$  в развернутом виде [11] следующее:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{ji} + \varepsilon_i, \quad (6)$$

здесь  $\beta_j$  — коэффициент (параметр)  $j$ -го фактора  $X_j$  в уравнении регрессии, определяемый методом наименьших квадратов;

$j$  — номер фактора;

$i$  — номер компоненты  $j$ -го фактора;

$n$  — количество факторов.

Для  $n = 5$  уравнение (6) имеет вид:

$$Y_i = \beta_0 \cdot 1_i + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{4i} + \beta_5 X_{5i} + \varepsilon_i. \quad (7)$$

Коэффициенты  $\beta_j$  в уравнении регрессии находились по методу наименьших квадратов [12]:

$$\beta_j = \text{cov}(Y, X_j) = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} \cdot Y_i}{N}, \quad (8)$$

где  $X_{ji}$  — значения кодированных факторов в матрице планирования  $X$ ;

$Y_i$  — значение отклика, полученного в результате эксперимента;

$N$  — число испытаний по плану.

Уравнение регрессии в случае ПФЭ имеет вид:

$$Y = 13,05 + 1,6X_1 - 0,225X_2 + 2,45X_3 + 1,93X_4 + 1,8X_5 + \varepsilon. \quad (9)$$

А функция регрессии в случае ДФЭ имеет вид:

$$\hat{Y} = 13,05 + 1,6X_1 - 0,225X_2 + 2,45X_3 + 1,93X_4 + 1,8X_5 - 0,225X_1X_4 + 1,6X_2X_4 - 0,325X_3X_4. \quad (10)$$

### Проверка значимости коэффициентов регрессии факторной модели

1. Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии

Для этого необходимо определить остаточную дисперсию модели  $DY$  и дисперсию коэффициентов регрессии  $D\beta_i$ :

$$DY = \frac{\sum_{k=1}^m (Y_k - \bar{Y})^2}{m-1}, \quad (11)$$

$$D\beta_i = \frac{DY}{N}, \quad (12)$$

где  $m = 3$  — число испытаний, проведенных в центральной области матрицы планирования.

В данном случае  $D\beta_i = \frac{1,085}{8} = 0,135$ .

Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась по критерию Стьюдента. При этом для каждого коэффициента вычислялось значение критерия:

$$t_i = \frac{|\beta_i|}{D\beta_i}, \quad (13)$$

где  $t_i$  — случайные величины, распределенные по закону Стьюдента;

$\beta_i$  — рассчитанные коэффициенты регрессии;

$D\beta_i$  — среднее квадратичное отклонение дисперсии коэффициента регрессии.

Полученные значения случайных величин  $t_i$  сравнивались с табличным значением критерия Стьюдента при числе степеней свободы  $l = m - 1$  на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ ,  $t_{0,95}(2) = 4,302$  [13]. Вклады в уравнение регрессии с коэффициентами, значения которых не попадают в доверительный интервал на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , были отброшены. В результате уравнение регрессии принимает вид:

$$\hat{Y} = 13,05 + 1,6X_1 + 2,45X_3 + 1,93X_4 + 1,8X_5 + 1,6X_2X_4. \quad (14)$$

Как видно из зависимости (14), влияние второго фактора — частоты колебаний трубопровода, а также сочетание факторов  $X_1 \cdot X_4$  поездной нагрузки и диаметра трубопровода и  $X_3 \cdot X_4$  — амплитуды колебаний и диаметра трубопровода в изучаемых пределах незначительно.

### 2. Проверка адекватности факторной модели

Для этого вычислялась остаточная дисперсия уравнения регрессии относительно экспериментальных данных:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i^2)}{N - k}, \quad (15)$$

где  $y_i$  — экспериментальные данные (отклики);

$\hat{y}_i$  — данные, полученные из эмпирического уравнения (14) при значениях аргументов, приведенных в матрице планирования;

$N - k$  — число степеней свободы;

$k$  — число коэффициентов в уравнении регрессии.

Проверка гипотезы об адекватности факторной модели (уравнения регрессии) эксперимен-

тальным данным проводилась с использованием  $F$  — статистики Фишера:

$$F = \frac{S^2}{DY}. \quad (16)$$

Для данного случая:

$$S^2 = \frac{22,84}{2} = 11,42; \quad F = \frac{11,42}{1,085} = 10,53.$$

Сравнение полученного значения  $F$  — статистики с табличным значением  $F_{0,05}(2, 2) = 19,0$  [13] подтверждает принятую гипотезу. Следовательно, факторная модель адекватна экспериментальным данным на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

### 3. Проверка адекватности факторной модели (уравнения регрессии) физике явления

При этом использовалось неравенство:

$$y = |\hat{y} - \bar{y}| \leq S \cdot t_{1-\alpha} \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}, \quad (17)$$

где  $S$  — среднее квадратичное отклонение дисперсии испытания.

Для  $t_{0,98}(3) = 4,54$  [13] на уровне значимости  $\alpha = 0,02$  с числом степеней свободы  $r = m_1 + m_2 - 2$ :

$$|12,67 - 13,05| < 1,04 \cdot 4,54 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{2}}.$$

Таким образом, уравнение регрессии с принятым уровнем значимости достаточно точно описывает процесс (эксперимент) в исследуемой области.

### Определение виброненадежности трубопроводов

Для практических целей представляет интерес связь классического аппарата теории надежности с реальными физическими процессами, следствием которых являются повреждения трубопроводов.

Для установления зависимости показателей надежности трубопроводов от физики процессов использовались полученная факторная модель (14) или уравнение регрессии, преобразованное путем перехода от кодированных значений факторов к натуральным данным по формуле:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i^*}{\Delta_i}, \quad (18)$$

где  $Z_i$  — значение фактора в натуральных измерениях;

$\bar{X}_i^*$  — значение фактора в центре изучаемой области;

$\Delta_i$  — интервал варьирования.

Тогда на основании данных табл. 2 получим:

$$Z_1 = \frac{P-50}{20}; Z_2 = \frac{\omega-50}{20}; Z_3 = \frac{A-200}{100};$$

$$Z_4 = \frac{D-200}{100}; Z_5 = \frac{H-2}{0,5}. \quad (19)$$

В результате натурных испытаний, проведенных на действующем железнодорожном трубопроводе при движении различных серий локомотивов, было установлено, что максимальные значения виброускорений зафиксированы при прохождении маневрового локомотива [1]. Данный факт объясняется тем, что тележка маневрового локомотива имеет наибольший вес необрессоренной части и максимальную жесткость рессорного подвешивания по сравнению с тележками других серий локомотивов [9].

Проведенные натурные испытания также показали, что при прохождении маневрового локомотива получен максимальный диапазон амплитуд смещения исследуемого трубопровода в пределах от 100 до 270 мк (табл. 2). Амплитуды смещения трубопровода выявленного диапазона, являются причиной большинства случаев повреждений железнодорожных трубопроводов.

Исходя из вышеизложенного, количество вибродинамических циклов в год, которым подвергаются железнодорожные трубопроводы ( $N$ ), определялось при движении маневрового локомотива по станции как вида транспорта, оказывающего наиболее разрушительные действия на трубы. Данные о маневровой работе локомотива на железнодорожной станции получены из источников [14–16].

Для примера принята внеклассная станция Санкт-Петербург-Главный, на которой выполняются все виды технологических операций. Используя суточный план-график работы станции, были получены данные о маневровых передвижениях локомотива по станционным путям. По технологическим картам маневровой работы локомотива на станции (перестановка составов, подача состава из Ранжирного парка) было определено время на основные технологические операции  $\Delta t = 219$  ч/год. Тогда число вибродинамических циклов в год, которым подвергаются железнодорожные трубопроводы при движении маневрового локомотива по станции, определялось:

$$N = \frac{L}{4 \cdot l_k} \cdot \frac{T}{\Delta t} \cdot 365 = 1,6 \text{ млн ц/год}, \quad (20)$$

где  $L = 2500$  м — расчетное расстояние передвижения локомотива (длина полурейса) при скорости 25 км/ч, м;

$T = 2920$  ч/год — среднее время работы локомотива в год;

$l_k = 1850$  мм — расстояние между колесными парами тележки маневрового локомотива;

$\Delta t$  — время на основные технологические операции маневрового локомотива на станции, ч/год.

Тогда интенсивность отказов трубопроводов при воздействии на них вибродинамической нагрузки от железнодорожного транспорта определяется следующим образом:

$$\lambda = \frac{1,6}{13,05 + 1,6 \cdot \left( \frac{P-50}{20} \right) + 2,45 \cdot \left( \frac{A-200}{100} \right) + 1,93 \cdot \left( \frac{D-200}{100} \right) + 1,8 \cdot \left( \frac{H-2}{0,5} \right) + 1,6 \cdot \left[ \left( \frac{\omega-50}{20} \right) \cdot \left( \frac{D-200}{100} \right) \right]} \quad (20)$$

Используя значение интенсивности отказов  $\lambda$  (20), можно определить продолжительность эксплуатации трубопроводов (среднее время между отказами) —  $\bar{T}$ . Для этого в практических вычислениях используется формула [17]:

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}, \text{ год.} \quad (21)$$

## Заключение

На основе ДФЭ типа  $2^{5-2}$  построена факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов. Выявлены основные факторы, влияющие на надежность железнодорожных трубопроводов: поездная нагрузка, амплитуда колебаний трубопровода и глубина его заложения. Частота колебаний не оказывает существенного влияния на процесс разрушения трубопроводов, однако из уравнения регрессии (14) следует, что частота колебаний трубопровода зависит от его диаметра.

Преобразованное уравнение регрессии (факторная модель) может использоваться в практических целях для определения интенсивности отказов и продолжительности эксплуатации трубопроводов между отказами с учетом реальных физических процессов влияния вибродинамической нагрузки от подвижного состава на территории железнодорожных станций.

На практике эксплуатации трубопроводов по величине  $\bar{T}$  устанавливается время проведения планово-предупредительных работ, выполнение

которых способствует повышению надежности рабочего состояния труб и, следовательно, обеспечению безопасности движения железнодорожного транспорта.

## Библиографический список

1. Постнова Е. В. Модель вибродинамических воздействий подвижного состава на железнодорожные трубопроводы / Е. В. Постнова, Е. В. Рунев // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. — 2021. — С. 105–108.
2. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний / Р. Мэнли. — М.: Машиностроение, 1982. — 367 с.
3. Postnova E. Mathematical model for assessing the reliability of water supply networks / E. Postnova, E. Runev // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402. — Pp. 343–351.
4. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М.: Наука, 1976. — 254 с.
5. Белов И. В. Математические методы в планировании на железнодорожном транспорте / И. В. Белов, А. Б. Каплан. — М.: Транспорт, 1972. — 248 с.
6. Яковлева Т. Г. Моделирование прочности и устойчивости земляного полотна / Т. Г. Яковлева, Д. И. Иванов. — М.: Транспорт, 1980. — 255 с.
7. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. МИИЖТ / И. В. Прокудин. — М., 1983. — 41 с.
8. Фришман М. А. Земляное полотно железных дорог / М. А. Фришман, И. Н. Хохлов, В. П. Титов. — М.: Транспорт, 1972. — 287 с.
9. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / Под общ. ред. А. И. Тищенко. — М.: Транспорт, 1976. — Т. 1. — 429 с.
10. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. — М.: Мир, 1980. — 610 с.
11. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. — М.: Высшая школа, 2001. — 207 с.
12. Яснопольский С. А. Построение эмпирических формул и подбор их параметров методом наименьших квадратов и методом средних / С. А. Яснопольский. — М.: Изд-во МИСиС, 1972. — 23 с.

13. Шор Я. Б., Таблицы для анализа и контроля надежности / Я. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин. — М.: Советское радио, 1968. — 284 с.

14. Петров А. Ю. Технология работы пассажирской станции: учебное пособие / А. Ю. Петров, П. К. Рыбин, И. Н. Шутов. — СПб.: ПГУПС, 2008. — 41.

15. Дубинский В. А. Технологический процесс работы пассажирской технической станции / В.А. Дубинский и др. — СПб.: ПГУПС, 1997. — Ч. 1 — 26 с., Ч. 2 — 40 с.

16. Нормативы для составления графика движения поездов ОАО «Российские железные дороги». — М.: Техноинформ, 2006.

17. Ильин Ю. А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования / Ю. А. Ильин. — М.: Стройиздат, 1985. — 240 с.

Дата поступления: 09.01.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

#### Контактная информация:

ПОСТНОВА Елена Владимировна — канд. техн. наук, доц.; elenapost@bk.ru

РУНЕВ Евгений Валентинович — ст. преподаватель; jr\_2010@mail.ru

## Factor Model of Vibrodynamic Load Effect on Pipeline Reliability

E. V. Postnova, E. V. Runev

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

**For citation:** Postnova. E. V., Runev E. V. Factor Model of Vibrodynamic Load Effect on Pipeline Reliability // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 91–100. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-91-100

### Summary

**Purpose:** To build a factor model of vibrodynamic loading influence on pipeline reliability based on the results of laboratory tests carried out taking into account the amplitude-frequency characteristics of the vibration process of the operating pipeline, obtained during full-scale tests at the railway station. On the basis of the factor model to determine the most significant factors affecting the reliability of pipelines under the action of vibrodynamic loading and to propose ways to improve their reliability. **Methods:** The plan of fractional factor experiment of  $2^{5-2}$  type was used to carry out laboratory tests of pipeline reliability under the influence of stresses of familiar constant cycle. The experiments were carried out on a test bench with a pulsating cylinder of type PC with a maximum load of 200 kN. Voltages were applied to the pipeline under test from control panels of static (from soil) and dynamic (from rolling stock) loads. Impulse shape was sinusoidal, the closest to natural one, cycle frequency — 300 c/min. The regression equation coefficients were calculated on a computer using the multiple linear correlation program. The significance of the regression coefficients was assessed by Student's t-test. Fisher's test was used to check the adequacy of the model to the experimental data. Adequacy of the regression equation to the physics of the phenomenon was tested using Student's t-test. **Results:** Tests of the pipeline with application of fractional factor experiment of  $2^{5-2}$  type allowed to build a factor model of the process under study in the form of polynomial of the first degree. It has been established that the main factors influencing pipeline reliability under vibrodynamic loading are train load, vibration amplitude of the pipeline and the depth of its embedding. The vibration frequency of the pipeline has no significant influence on the pipeline reliability. However, from the regression equation it follows that the pipeline vibration frequency depends on its diameter. **Practical significance:** The equation of linear regression is obtained, which is transformed by switching from coded values of factors to natural values, which can be used for practical purposes to determine the intensity of failures and the duration of operation of pipelines between failures.

**Keywords:** Factor influence model, experiment planning, factor matrix, amplitude-frequency characteristics of the oscillatory process of the pipeline, full factor experiment, fractional factor experiment.

## References

1. Postnova E. V., Runev E. V. Model' vibrodinamicheskikh vozdeystviy podvizhnogo sostava na zheleznodorozhnye truboprovody [Model of vibrodynamic effects of rolling stock on railway pipelines]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings]. 2021, pp. 105–108. (In Russian)
2. Manley R. *Analiz i obrabotka zapisey kolebaniy* [Analysis and Processing of Vibration Records]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982, p. 367. (In Russian)
3. Postnova E., Runev E. Mathematical model for assessing the reliability of water supply networks. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 402, pp. 343–351.
4. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experimental Planning in Finding Optimal Conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976, p. 254. (In Russian)
5. Belov I. V., Kaplan A. B. *Matematicheskie metody v planirovanii na zheleznodorozhnom transporte* [Mathematical methods in planning on railway transport]. Moscow: Transport Publ., 1972, p. 248. (In Russian)
6. Yakovleva T. G., Ivanov D. I. *Modelirovanie prochnosti i ustoychivosti zemlyanogo polotna* [Modeling of Strength and Stability of Earthbed]. Moscow: Transport Publ., 1980, p. 255. (In Russian)
7. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistyykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku: avtoref. disc. ... d-ra tekhn. nauk. MIIZhT* [Strength and deformability of a railway subgrade made of clay soils that perceive a vibrodynamic load: Ph.D. dIss. ... Dr. tech. Sciences. MIIZhT]. Moscow, 1983, 41 p. (In Russian)
8. Frishman M. A., Khokhlov I. N., Titov V. P. *Zemlyanoe polотно zheleznykh dorog* [Ground bed of railways]. Moscow: Transport Publ., 1972, p. 287. (In Russian)
9. *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizel'-poezdam. Pod obshch. red. A. I. Tishchenko* [Handbook of electric rolling stock, diesel locomotives and diesel trains. Ed. ed. A. I. Tishchenko]. Moscow: Transport Publ., 1976, vol 1, 429 p. (In Russian)
10. Johnson N., Lyon F. *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke* [Statistics and experiment planning in engineering and science]. Moscow: Mir Publ., 1980, p. 610. (In Russian)
11. Wentzel E. S. *Issledovanie operatsiy* [Operations Research]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001, p. 207. (In Russian)
12. Yasnopolsky S. A. *Postroenie empiricheskikh formul i podbor ikh parametrov metodom naimen'shikh kvadratov i metodom srednikh* [Construction of empirical formulas and selection of their parameters by the method of least squares and the method of averages]. Moscow: MISIS Publ., 1972, p. 23. (In Russian)
13. Shor Y. B., Kuzmin F. I. *Tablitsy dlya analiza i kontrolya nadezhnosti* [Tables for reliability analysis and control]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1968, p. 284. (In Russian)
14. Petrov A. Y., Rybin P. K., Shutov I. N. *Tekhnologiya raboty passazhirskoy stantsii: uchebnoe posobie* [Technology of the passenger station: a training manual]. St. Petersburg: PSUPS Publ., 2008, 41 p. (In Russian)
15. Dubinsky V. A. et al. *Tekhnologicheskii protsess raboty passazhirskoy tekhnicheskoy stantsii* [Technological process of passenger technical station operation]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1997, part 1 — 26 p., part 2 — 40 p. (In Russian)
16. *Normativy dlya sostavleniya grafika dvizheniya poezdov OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi"* [Norms for making up train schedules of Russian Railways OJSC]. Moscow: Tekhnoinform Publ., 2006. (In Russian)
17. Ilyin Y. A. *Nadezhnost' vodoprovodnykh sooruzheniy i oborudovaniya* [Reliability of waterworks structures and equipment]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1985, p. 240. (In Russian)

Received: January 09, 2023

Accepted: February 28, 2023

### Author's information:

Elena V. POSTNOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; elenapost@bk.ru

Evgeniy V. RONEV — Senior Lecturer; jr\_2010@mail.ru



УДК 533+524.7

## Распределение плотности в газовой оболочке планеты

**Е. Н. Бодунов, А. О. Семенов**

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

**Для цитирования:** Бодунов Е. Н., Семенов А. О. Распределение плотности в газовой оболочке планеты // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 101–109. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-101-109

### Аннотация

**Цель:** Теоретическое исследование распределения плотности газа вокруг планеты с учетом самогравитации. **Методы:** Предложенные в настоящей работе уравнения для плотности газовой оболочки планеты с соответствующими граничными условиями решаются аналитически и численно методом Рунге — Кутты. **Результаты:** Впервые с помощью метода подобия проведен анализ численного решения уравнений для всего пространства, в котором преобладает гравитационное влияние планеты — в диапазоне расстояний от поверхности планеты до радиуса Хилла. Вблизи планеты решение совпадает с классической барометрической формулой, на промежуточных расстояниях — с барометрической формулой, учитывающей зависимость ускорения свободного падения от расстояния до планеты, на больших расстояниях — с зависимостью плотности для сингулярной изотермической газовой сферы, обусловленной самогравитацией. **Практическая значимость:** На основе полученного решения создана единая картина распределения плотности газовой оболочки планеты. Представленные в работе результаты могут быть полезны как для преподавателей физики вузов, так и для научных сотрудников, занимающихся астрофизикой.

**Ключевые слова:** Газовая оболочка планеты, самогравитация, барометрическая формула, уравнение Пуассона, плотность газа в газовых скоплениях, радиус Хилла.

### Введение

В учебниках по общей физике зависимость давления газа  $p(z)$  от высоты  $z = r - R_c$  над поверхностью планеты ( $R_c$  — радиус планеты,  $r$  — расстояние от центра планеты) обычно описывается барометрической формулой, имеющей вид:

$$\frac{p(z)}{p_0} = e^{-z/H_0}, \quad (1)$$

где  $p_0$  — давление на поверхности планеты (при  $z = 0$ );

$H_0$  — шкала высот (высота, на которой давление газа в атмосфере уменьшается в  $e$  раз) или же высота однородной атмосферы (толщина, которую имела бы атмосфера, если всюду в ней давление было бы такое же, как на поверхности):

$$H_0 = \frac{kT_0}{mg_0} = \frac{kT_0 R_c^2}{GM_c m}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2)  $k$  — постоянная Больцмана,  $g_0$  — ускорение свободного падения,  $g_0 = GM_c/R_c^2$  ( $G$  — гравитационная постоянная,  $M_c$  — масса планеты),  $T_0$  — температура. Формула (1) получена при следующих предположениях: атмосферный газ считается идеальным, состоит из молекул массы  $m$ , находится при постоянной температуре  $T = T_0$  в гравитационном поле планеты, ускорение свободного падения  $g$  не зависит от  $z$  и равно ускорению свободного падения  $g_0$  на поверхности планеты (при  $z = 0$ ). При выводе уравнения (1) обычно постулируется, что давление на высоте  $z$  обусловлено

весом вышележащего столба газа. С другими методами вывода барометрической формулы, а также с историей вопроса можно ознакомиться в кратком обзоре [1].

Несмотря на свою простоту и сделанные при ее выводе предположения, формула (1) достаточно хорошо передает зависимость давления от высоты в нижних слоях земной атмосферы. Отметим, что так как идеальный газ подчиняется уравнению  $p = \rho kT / m$  ( $\rho$  — плотность газа,  $\rho = nm$ ,  $n$  — концентрация газа), то барометрическая формула (1) описывает также распределение концентрации и плотности газа в изотермической атмосфере, так как  $n(z)/n_0 = \rho(z)/\rho_0 = p(z)/p_0$  ( $n_0$  и  $\rho_0$  — концентрация и плотность газа на поверхности планеты).

Если учесть зависимость ускорения свободного падения от высоты  $z$  ( $g = GM_c/(R_c + z)^2 = GM_c/r^2$ ), то барометрическая формула приобретает вид [1, 2]:

$$\frac{p(r)}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{n(r)}{n_0} = \exp\left(-\frac{GM_c m}{kT_0} \left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{r}\right)\right) = \exp\left(-\frac{R_c}{H_0} \left(1 - \frac{R_c}{r}\right)\right). \quad (3)$$

Уравнение (3) является следствием распределения Больцмана, согласно которому в состоянии термодинамического равновесия отношение концентраций газа на разных высотах ( $R_c$  и  $r$ ) в потенциальном поле определяется разностью потенциальных энергий молекул газа  $W(R_c) - W(r)$ , деленной на  $kT_0$ :

$$\frac{n(r)}{n_0} = \exp\left(\frac{W(R_c)}{kT_0} - \frac{W(r)}{kT_0}\right) = \exp\left(-\frac{GM_c m}{kT_0} \frac{1}{R_c} + \frac{GM_c m}{kT_0} \frac{1}{r}\right). \quad (4)$$

Несмотря на давнюю историю, барометрическая формула продолжает интересовать препо-

давателей физики и научных работников с точки зрения ее использования в учебной работе, обобщения на случай неидеального газа, наличия центробежных сил и так далее [1–7], применения в различных приложениях, начиная с метеорологических [8–11] и заканчивая физикой плазмы [12], ядерной физикой [13, 14] и астрофизикой [15–18].

Недостатком обобщенной барометрической формулы (3), согласно, например, классическому учебнику Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица [2], является стремление концентрации газа  $n$  при  $r \rightarrow \infty$  к постоянной величине,  $n(r \rightarrow \infty) = n_0 \exp(-R_c/H_0)$ , что некорректно, так как конечное количество газа не может быть распределено по бесконечному объему с отличной от нуля концентрацией. Этот недостаток барометрической формулы (3) можно исправить, если предположить уменьшение температуры газа до нуля с увеличением высоты быстрее, чем  $(1 + z/R_c)^{-2}$  [1, 7]. Однако известно, что температура газа на больших высотах в атмосфере отлична от нуля.

Дополнительным фактором, не учтенным в (3) и приводящим к удержанию газа вблизи планеты, является самогравитация [15–18]: газ на расстоянии  $r$  удерживается не только притяжением со стороны планеты, но и со стороны слоев газа, расположенных ниже — на расстояниях, меньших  $r$ . Как известно [15–18], самогравитация используется в астрофизике для объяснения пространственного строения звезд, галактик и газопылевых структур.

В настоящей работе теоретически исследуется влияние самогравитации на распределения плотности газа вокруг планеты.

### Система уравнений, численное решение и обсуждение результатов

В астрофизике самогравитация рассматривается на основе уравнения Пуассона. Это уравнение можно получить следующим образом. Рассмотрим твердое ядро планеты, окруженное

сферически симметричной самогравитирующей оболочкой из идеального изотермического газа, находящегося в гидростатическом равновесии. Условие гидростатического равновесия такой оболочки можно записать в виде системы из двух уравнений [19, 20]:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dr} = -\frac{GM}{r^2} \rho, \\ \frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho, \end{cases} \quad (5)$$

где  $M$  — масса, заключенная в сфере радиуса  $r$ .

Дифференцируя первое уравнение (5) по  $r$  и подставляя в него второе уравнение, с учетом уравнения состояния идеального газа ( $p = \rho kT / m$ ) получаем уравнение Пуассона:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d \ln \rho}{dr} \right) = -4\pi G \frac{m}{kT} \rho. \quad (6)$$

Это уравнение можно представить также в интегральном виде:

$$\frac{\rho(r)}{\rho_0} = \exp \left( -\frac{GmM_c}{kT_0} \left( \frac{1}{R_c} - \frac{1}{r} \right) - \int_{R_c}^r \frac{Gm}{kT_0} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{x^2} \left( \int_{R_c}^x 4\pi \rho(y) y^2 dy \right) dx \right). \quad (7)$$

В приближении малой массы атмосферы по сравнению с массой планеты (т. е. когда вклад интегрального слагаемого в экспоненте мал) уравнение (7) можно решать итерационным методом. Из уравнения (7), эквивалентного уравнению (6), отчетливо видно, что на малых расстояниях от планеты и при малых плотностях газа ( $\rho \rightarrow 0$ ), когда самогравитацией можно пренебречь (второе слагаемое под знаком экспоненты равно нулю), распределение плотности газа имеет вид барометрической формулы (3). На больших расстояниях, где самогравитация преобладает над притяжением планеты (первым слага-

емым под знаком экспоненты в (7) можно пренебречь), уравнения (6) и (7) имеют аналитическое решение:

$$\rho(r) = \frac{kT_0}{2\pi Gm} \frac{1}{r^2} = \frac{2}{3} \frac{\rho_c}{\rho_0} \frac{H_0 R_c}{r^2}. \quad (8)$$

Введем безразмерную координату  $x$  и два безразмерных параметра:

$$x = r / R_c, \quad a = R_c / H_0, \quad b = \rho_0 / \rho_c, \quad (9)$$

где  $\rho_c$  — плотность ядра (планеты),  $M_c = (4\pi/3) \rho_c R_c^3$ . Параметр  $a$  — безразмерный радиус планеты, выраженный в единицах  $H_0$ . Параметр  $b$  есть отношение плотности газа  $\rho_0$  у поверхности ядра (планеты) к плотности ядра  $\rho_c$  (планеты). Используя параметры (9), уравнение (8) преобразуем к виду:

$$\frac{\rho(r)}{\rho_0} = \frac{2}{3} \frac{1}{ab} \frac{1}{x^2}. \quad (10)$$

В общем случае (в том числе и в рассматриваемом в настоящей работе — газовая оболочка, в центре которой находится однородное ядро конечных размеров) уравнение (6) может быть решено только численно.

Проинтегрировав второе уравнение системы (5) от 0 до  $r > R_c$ , получим:

$$M = M_c + \int_{R_c}^r 4\pi r^2 \rho dr. \quad (11)$$

Для уменьшения количества параметров задачи (с целью изучения свойств решения системы уравнений (5)) используем метод подобия, успешно применяющийся в теории планетных атмосфер (см., например, [21, 22]).

Введем безразмерные функции:

$$u = \rho / \rho_0, \quad f = M / M_c. \quad (12)$$

С помощью безразмерных величин (12) и параметров (9) система уравнений (5) записывается в виде:

Параметры Земли, Юпитера и протоюпитера (в скобках указаны единицы измерения)

| Планета                                                                        | Земля  | Юпитер            | Протоюпитер <sup>1*</sup> |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------|---------------------------|
| Плотность планеты $\rho_c$ (кг/м <sup>3</sup> )                                | 5500   | 1326              | 5500                      |
| Плотность газовой оболочки у поверхности планеты $\rho_0$ (кг/м <sup>3</sup> ) | 1,22   | 0,16              | ~200 <sup>2*</sup>        |
| Средняя молекулярная масса $m$ (а. е. м)                                       | 28,5   | 2,3               | 2,3                       |
| Температура у поверхности $T_0$ (К)                                            | 288    | 129               | 5000                      |
| Масса планеты $M_c$ ( $M_E$ ) <sup>3*</sup>                                    | 1      | 318               | 1–25 <sup>4*</sup>        |
| Радиус планеты $R_c = (3M_c/4\pi\rho_c)^{1/3}$ ( $R_E$ ) <sup>5*</sup>         | 1      | 11                | 1–3                       |
| Ускорение свободного падения $g_0 = GM_c/R_c^2$ (м/с <sup>2</sup> )            | 9,8    | 25,9              | 9,8–28,7                  |
| Шкала высот $H_0 = kT_0/mg_0$ (км)                                             | 8,6    | 18                | 630–1840                  |
| $a = R_c/H_0$                                                                  | 744    | 3886              | 3,46–29,6                 |
| $b = \rho_0/\rho_c$                                                            | 0,0002 | $3 \cdot 10^{-5}$ | 0,036                     |

Примечания:

<sup>1\*</sup>Под протоюпитером понимается твердое ядро будущей планеты на месте современного Юпитера в протопланетном облаке на раннем этапе образования планет Солнечной системы;

<sup>2\*</sup> порядок величины взят из [20];

<sup>3\*</sup>  $M_E = 5,97217 \cdot 10^{-24}$  кг — масса Земли;

<sup>4\*</sup> массы твердых ядер внутри современных планет — гигантов Солнечной системы оцениваются как 15–25  $M_E$  [23];

<sup>5\*</sup>  $R_E = 6371$  км — радиус Земли.

$$\begin{cases} \frac{du}{dx} = -\frac{af}{x^2}u, \\ \frac{df}{dx} = 3bx^2u. \end{cases} \quad (13)$$

Система уравнений (13) решалась численно методом Рунге — Кутты со следующими граничными условиями на поверхности планеты:

$$u(1) = 1 \text{ и } f(1) = 1. \quad (14)$$

Расчеты производились для набора параметров  $a$  и  $b$  (9), характерных для Земли, Юпитера и протоюпитера (таблица).

Результаты численных расчетов приведены на рисунке (синие, зеленые и красные кривые). Пунктирной серой кривой добавлено аналитическое решение уравнений (13) без учета самогравитации (при  $f \equiv 1$ ):

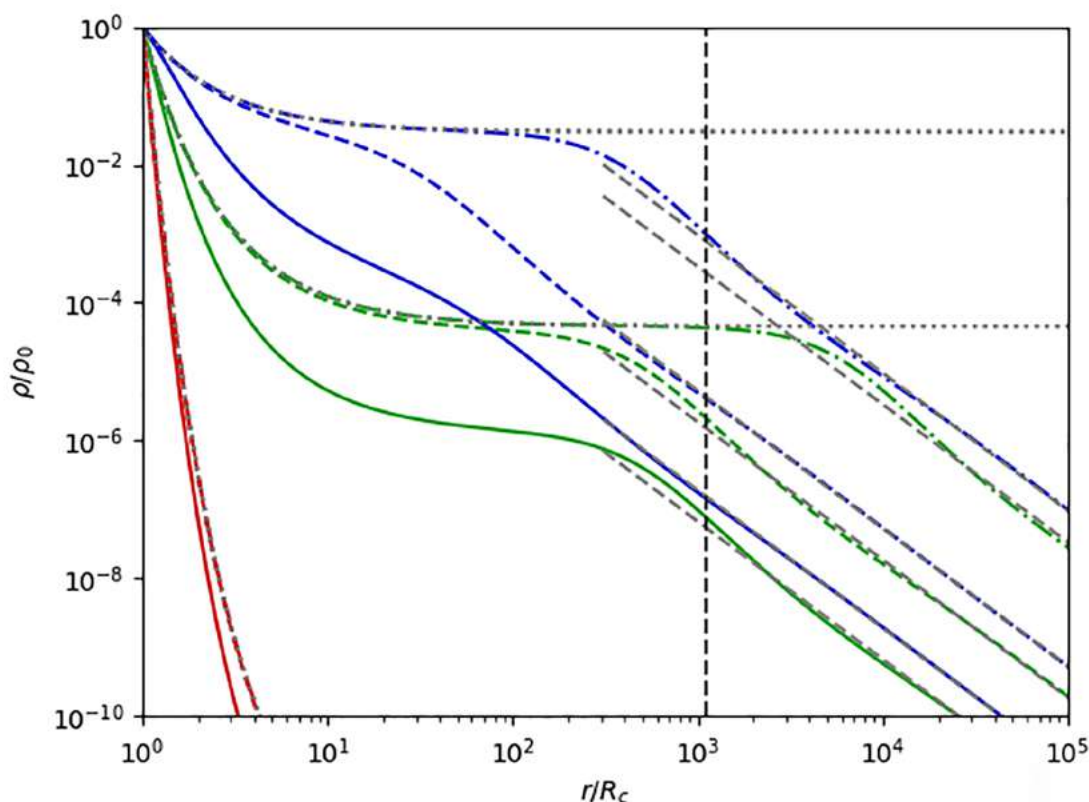
$$\frac{\rho}{\rho_0} = u = \exp\left(-\frac{a(x-1)}{x}\right). \quad (15)$$

Это уравнение есть уравнение (3), записанное через безразмерные параметры. На больших высотах ( $x \gg 1$ ) функция (15) стремится к постоянному (асимптотическому) значению:

$$\rho / \rho_0 = \exp(-a). \quad (16)$$

С учетом самогравитации численные решения отклоняются от асимптотики (16) (степень отклонения зависит от параметра  $b$ , см. рисунок) и приближаются к другому предельному случаю — к выражению (10) с зависимостью  $\rho/\rho_0 \sim 1/x^2$ , соответствующей газовой оболочке с массой, значительно большей массы планеты. Приравняв асимптотики (16) и (10), можно оценить безразмерную высоту  $x_g$ , начиная с которой становится существенно влияние самогравитации на плотность газовой оболочки:

$$x_g = \sqrt{\frac{2}{3ab}} e^a. \quad (17)$$



Зависимость плотности газовой оболочки планеты от безразмерного расстояния  $x = r / R_c$  при различных значениях параметров  $a$  и  $b$ . Красные кривые —  $a = 30$ , зеленые —  $a = 10$ , синие —  $a = 3,5$ , сплошные кривые —  $b = 1$ , штриховые —  $b = 0,036$ , штрихпунктирные —  $b = 0,002$ . Серая пунктирная кривая — расчет по барометрической формуле (15), серая штриховая кривая — расчет по формуле (10), вертикальная черная штриховая линия — безразмерный радиус Хилла для системы Юпитер и Солнце (18)

Отметим, что область гравитационного влияния планеты ограничена радиусом Хилла [24]  $r_H$  — радиусом сферической области вокруг планеты, внутри которой гравитационное влияние планеты преобладает над гравитационным влиянием звезды:

$$r_H = D \sqrt[3]{\frac{M}{3M_*}}, \quad (18)$$

где  $D$  — расстояние от планеты до звезды;  
 $M_*$  — масса звезды.

Только внутри области, ограниченной радиусом Хилла, ядро планеты способно гравитационно удерживать свою газовую оболочку.

Предполагая, что масса  $M$  в основном определяется массой планеты  $M_c$ , формулу (18) можно переписать в виде:

$$\frac{r_H}{R_c} = \sqrt[3]{\frac{\rho_c}{\rho_*} \frac{D}{R_*}}, \quad (19)$$

где  $R_*$  — радиус звезды;

$\rho_c$  и  $\rho_*$  — плотности планеты и звезды соответственно.

Считая, что плотности планеты  $\rho_c$  и звезды  $\rho_*$  примерно равны, и учитывая, что  $\rho_c$  и  $\rho_*$  входят в уравнение (19) под знаком кубического корня, можно считать, что отношение  $r_H/R_c$

определяется только отношением  $D/R_*$ , т. е. значение  $r_H/R_c$  является фиксированным для заданного положения планеты и не зависящим от параметров  $a$  и  $b$ .

На рисунке вертикальной черной штриховой линией показан безразмерный радиус Хилла (19) для системы Юпитер и Солнце ( $r_H/R_c \approx 1,06 \cdot 10^3$ ). Из рисунка следует, что для параметров  $a$  и  $b$ , характерных для протоюпитера, внутри радиуса Хилла наблюдаются все три предельных случая зависимости плотности газовой оболочки, соответствующих барометрической формуле (3), выходу на плато (асимптотика (16)) и обратной степенной зависимости (10).

Для Земли ( $r_H/R_c \approx 0,21 \cdot 10^3$ ) и Юпитера, для которых параметр  $a$  очень большой (744 и 3886 соответственно), а плотность  $\rho_0$  мала, плотность газовой оболочки  $\rho$  в области плато (в соответствии с формулой (15)) чрезвычайно мала, и расстояние, начиная с которого следует учитывать самогравитацию, становится значительно больше радиуса Хилла. Поэтому для этих планет на всех разумных расстояниях (меньших радиуса Хилла) справедливы формулы (3) и (15).

Без сомнения, ситуация, подобная протоюпитеру, возможна и для других планетных систем.

## Заключение

В настоящей работе численно получено единое решение уравнений для плотности газовой оболочки планеты для всего пространства, в котором преобладает гравитационное влияние планеты, — в диапазоне расстояний от поверхности планеты до радиуса Хилла, и впервые проведен анализ полученного решения методом подобия. Вблизи планеты решение совпадает с классической барометрической формулой, на промежуточных расстояниях — с барометрической формулой, учитывающей зависимость ускорения свободного падения от расстояния до планеты, на больших расстояниях — с зависи-

мостью плотности для сингулярной изотермической газовой сферы, обусловленной самогравитацией.

Полученные результаты могут быть полезны как для преподавателей физики высших учебных заведений, так и для научных сотрудников, занимающихся астрофизикой.

## Библиографический список

1. Berberan-Santos M. N. On the Barometric Formula / M. N. Berberan-Santos, E. N. Bodunov, L. Pogliani // *Amer. J. Phys.* — 1997. — Vol. 65. — P. 404. — DOI: 10.1119/1.18555.
2. Landau L. D. *Statistical Physics* / L. D. Landau, E. M. Lifshiz. — Pergamon Press, 1969. — Vol. 5. — P. 108.
3. Berberan-Santos M. N. Liquid — Vapor Equilibrium in a Gravitational Field / M. N. Berberan-Santos, E. N. Bodunov, L. Pogliani // *Amer. J. Phys.* — 2002. — Vol. 70. — P. 438. DOI: 10.1119/1.1424264.
4. Berberan-Santos M. N. On the Barometric Formula inside the Earth / M. N. Berberan-Santos, E. N. Bodunov, L. Pogliani // *J. Math. Chem.* — 2010. — Vol. 47. — P. 990. — DOI: 10.1007/s10910-009-9620-7.
5. Rodrigues D. S. Analyzing Atmospheric Pressure Variations in Time and Height: a Didactic Proposal Employing a Smartphone Barometer / D. S. Rodrigues, F. J. Arnold // *Revista Brasileira de Ensino de Física.* — 2022. — Vol. 44. — P. e20210422. — DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0422.
6. Sliško J. The Physical Cause of Atmospheric Pressure: Weight of Air or Molecular Motion and Impacts? / J. Sliško, T. M. Topalović, M. Božić // *The Physics Teacher.* — 2021. — Vol. 59. — P. 470. — DOI: 10.1119/10.0006132.
7. Bodunov E. N. Barometric Formula for Non-Isothermal Atmosphere / E. N. Bodunov, G. G. Khokhlov // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2021. — Vol. 2131. — P. 022053. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022053.
8. Wang J. Improving the Vertical Modeling of Tropospheric Delay / J. Wang, K. Balidakis, F. Zus et al. // *Geophys. Research Lett.* — 2022. — Vol. 49(5). — P. e2021GL096732. — DOI: 10.1029/2021GL096732.

9. Michalak P. Impact of Air Density Variation on a Simulated Earth-to-Air Heat Exchanger's Performance / P. Michalak // *Energies*. — 2022. — Vol. 15(9). — P. 3215. — DOI: 10.3390/en15093215.
10. Stenner C. Development and Persistence of Hazardous Atmospheres in a Glaciovolcanic Cave System — Mount Rainier, Washington, USA. / C. Stenner, A. Pflitsch, L. J. Florea et al. // *J. Cave & Karst Studies*. — 2022. — Vol. 84(2). — P. 66. — DOI: 10.4311/2021ex0102.
11. Chkeir S. Nowcasting extreme rain and extreme wind speed with machine learning techniques applied to different input datasets / S. Chkeir, A. Anesiadou, A. Mascitelli et al. // *Atmospheric Research*. — 2023. — Vol. 282. — P. 106548. — DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106548.
12. Dubinov A. E. Mathematical Tricks for Pseudopotentials in the Theories of Nonlinear Waves in Plasmas / A. E. Dubinov // *Physics of Plasmas*. — 2022. — Vol. 29. — P. 020901. — DOI: 10.1063/5.0078573.
13. Dubinov A. E. Barometric Formula for Ultrarelativistic Degenerate Fermi-Gases / A. E. Dubinov // *Astrophysics*. — 2020. — Vol. 63(4). — P. 580. — DOI: 10.1007/s10511-020-09660-1.
14. Moon J. Design of Air-cooled Waste Heat Removal System with String Type Direct Contact Heat Exchanger and Investigation of Oil Film Instability / J. Moon, Y. H. Jeong, Y. Addad // *Nuclear Engineering and Technology*. — 2020. — Vol. 52(4). — P. 734. — DOI: 10.1016/j.net.2019.10.010.
15. Shu F. N. The Physics of Astrophysics / F. N. Chu. — California: Univer. Sci. Books, 1992. — Vol. II — P. 246.
16. Ткаченко Р. В. Гравитационная неустойчивость газопылевых околоядерных дисков близких галактик / Р. В. Ткаченко, В. И. Корчагин, Б. Б. Жмайлов. // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. — 2022. — Т. 9(67). — № 3. — С. 561. — DOI: 10.21638/spbu01.2022.316.
17. Patra N. N. Theoretical modelling of two-component molecular discs in spiral galaxies / N. N. Patra // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Vol. 638. — P. A66. — DOI: 10.1051/0004-6361/201936483.
18. Bodmer D. Asymptotic tracking position control with active oscillation damping of a multibody Mars vehicle using two artificial augmentation approaches / D. Bodmer, M. Krenmayr, F. Holzapfel // *CEAS Space J.* — 2022. — Vol. 14. — P. 125. — DOI: 10.1007/s12567-021-00364-6.
19. Тейлер Р. Строеение и эволюция звезд / Р. Тейлер. — М.: Мир, 1973. — 276 с.
20. Mizuno H. Formation of the Giant Planets / H. Mizuno // *Progress of Theoretical Physics*. — 1980. — Vol. 64(2). — P. 544. — DOI: 10.1143/PTP.64.544.
21. Semenov A. O. Upper Thermal Boundary Layer of Planetary Atmosphere: An Attempt of Developing a General Model / A. O. Semenov, G. M. Shved // *Icarus*. — 2008. — Vol. 194(1). — P. 290. — DOI: 10.1016/j.icarus.2007.08.040.
22. Shved G. M. The Standard Problem of Nonlocal Thermodynamic Equilibrium Radiative Transfer in the Rovibrational Band of the Planetary Atmosphere / G. M. Shved, A. O. Semenov // *Solar System Research*. — 2001. — Vol. 35. — P. 212. — DOI: 10.1023/A:1010478906172.
23. Bodenheimer P. Calculations of the Accretion and Evolution of Giant Planets: The Effects of Solid Cores / P. Bodenheimer, J. B. Pollack // *Icarus*. — 1986. — Vol. 67(3). — P. 391. — DOI: 10.1016/0019-1035(86)90122-3.
24. Pečnik B. Giant Planet Formation. A First Classification of Isothermal Protoplanetary Equilibria / B. Pečnik, G. Wuchterl // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — Vol. 440. — P. 1183. — DOI: 10.1051/0004-6361:200500005.
- Дата поступления: 23.01.2023  
Решение о публикации: 14.02.2023
- Контактная информация:**  
БОДУНОВ Евгений Николаевич — д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой «Физика»;  
evgeny.bodunov@inbox.ru  
СЕМЕНОВ Алексей Олегович — канд. физ.-мат. наук, доц.; aleksem@mail.ru

## Density Distribution in the Gaseous Envelope of the Planet

E. N. Bodunov, A. O. Semenov

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

**For citation:** Bodunov E. N., Semenov A. O. Density Distribution in the Gaseous Envelope of the Planet // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 101–109. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-101-109

### Summary

**Purpose:** Theoretical study of gas density distribution around the planet given self-gravity. **Methods:** Proposed in this paper equations for the planet gaseous envelope density with corresponding boundary conditions are solved analytically and numerically by Runge-Kutta method. **Results:** For the first time, the analysis of numerical solution of equations for all the space where the planet gravitational influence prevails - in the distance range from the planet surface till Hill radius - has been pursued using similarity method. Near the planet, the solution coincides with classical barometric formula, at intermediary distances, - with barometric formula which takes into consideration the dependence of free fall acceleration from the distance till the planet, at large distances, - with the dependence of density for singular isothermal gas sphere due to self-gravity. **Practical significance:** On the basis of the solution obtained, the unified picture of the planet gaseous envelope density distribution was analyzed. The results presented in the paper can be useful both for university physics professors and for the researchers involved in astrophysics.

**Keywords:** The planet gaseous environment, self-gravity, barometric formula, Poisson equation, gas density in gaseous accumulations, Hill radius.

### References

1. Berberan-Santos M. N., Bodunov E. N., Pogliani L. On the Barometric Formula. *Amer. J. Phys*, 1997, vol. 65, p. 404. DOI: 10.1119/1.18555.
2. Landau L. D., Lifshiz E. M. *Statistical Physics*. Pergamon Press, 1969, vol. 5, p. 108.
3. Berberan-Santos M. N., Bodunov E. N., Pogliani L. Liquid — Vapor Equilibrium in a Gravitational Field, 2002, vol. 70, p. 438. DOI: 10.1119/1.1424264.
4. Berberan-Santos M. N., Bodunov E. N., Pogliani L. On the Barometric Formula inside the Earth. *J. Math. Chem*, 2010, vol. 47, p. 990. DOI: 10.1007/s10910-009-9620-7.
5. Rodrigues D. S., Arnold F. J. Analyzing Atmospheric Pressure Variations in Time and Height: a Didactic Proposal Employing a Smartphone Barometer. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2022, vol. 44, p. e20210422. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0422.
6. Sliško J., Topalović T. M., Božić M. The Physical Cause of Atmospheric Pressure: Weight of Air or Molecular Motion and Impacts? *The Physics Teacher*, 2021, vol. 59, p. 470. DOI: 10.1119/10.0006132.
7. Bodunov E. N., Khokhlov G. G. Barometric Formula for Non-Isothermal Atmosphere. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2131, p. 022053. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022053.
8. Wang J., Balidakis K., Zus F. et al. Improving the Vertical Modeling of Tropospheric Delay. *Geophys. Research Lett*, 2022, vol. 49(5), p. e2021GL096732. DOI: 10.1029/2021GL096732.
9. Michalak P. Impact of Air Density Variation on a Simulated Earth-to-Air Heat Exchanger's Performance. *Energies*, 2022, vol. 15(9), p. 3215. DOI: 10.3390/en15093215.
10. Stenner C., Pflitsch A., Florea L. J. et al. Development and Persistence of Hazardous Atmospheres in a Glaciovolcanic Cave System — Mount Rainier, Washington, USA. *J. Cave & Karst Studies*, 2022, vol. 84(2), p. 66. DOI: 10.4311/2021ex0102.



11. Chkeir S., Anesiadou A., Mascitelli A. et al. Nowcasting extreme rain and extreme wind speed with machine learning techniques applied to different input datasets. *Atmospheric Research*, 2023, vol. 282, p. 106548. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106548.
12. Dubinov A. E. Mathematical Tricks for Pseudopotentials in the Theories of Nonlinear Waves in Plasmas. *Physics of Plasmas*, 2022, vol. 29, p. 020901. DOI: 10.1063/5.0078573.
13. Dubinov A. E. Barometric Formula for Ultrarelativistic Degenerate Fermi-Gases. *Astrophysics*, 2020, vol. 63(4), p. 580. DOI: 10.1007/s10511-020-09660-1.
14. Moon J., Jeong Y. H., Addad Y. Design of Air-cooled Waste Heat Removal System with String Type Direct Contact Heat Exchanger and Investigation of Oil Film Instability. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, vol. 52(4), p. 734. DOI: 10.1016/j.net.2019.10.010.
15. Shu F. N. *The Physics of Astrophysics*. California: Univer. Sci. Books, 1992, vol. II, p. 246.
16. Tkachenko R. V., Korchagin V. I., Zhmaylov B. B. Gravitatsionnaya neustoychivost' gazopylevykh okoloyadernykh diskov blizkikh galaktik [Gravitational instability of gas and dust circumnuclear disks of nearby galaxies]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya* [Bulletin of St. Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy]. 2022, vol. 9(67), Iss. 3, pp. 561. DOI: 10.21638/spbu01.2022.316. (In Russian)
17. Patra N. N. Theoretical modelling of two-component molecular discs in spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, vol. 638, p. A66. DOI: 10.1051/0004-6361/201936483.
18. Bodmer D., Krenmayr M., Holzapfel F. Asymptotic tracking position control with active oscillation damping of a multibody Mars vehicle using two artificial augmentation approaches. *CEAS Space J.*, 2022, vol. 14, p. 125. DOI: 10.1007/s12567-021-00364-6.
19. Teyler R. *Stroenie i evolyutsiya zvezd* [Structure and evolution of stars]. Moscow: Mir Publ., 1973, 276 p. (In Russian)
20. Mizuno H. Formation of the Giant Planets. *Progress of Theoretical Physics*, 1980, vol. 64(2), p. 544. DOI: 10.1143/PTP.64.544.
21. Semenov A. O., Shved G. M. Upper Thermal Boundary Layer of Planetary Atmosphere: An Attempt of Developing a General Model. *Icarus*, 2008, vol. 194(1), p. 290. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.08.040.
22. Shved G. M., Semenov A. O. The Standard Problem of Nonlocal Thermodynamic Equilibrium Radiative Transfer in the Rovibrational Band of the Planetary Atmosphere. *Solar System Research*, 2001, vol. 35, p. 212. DOI: 10.1023/A:1010478906172.
23. Bodenheimer P., Pollack J. B. Calculations of the Accretion and Evolution of Giant Planets: The Effects of Solid Cores. *Icarus*. 1986, vol. 67(3), p. 391. DOI: 10.1016/0019-1035(86)90122-3.
24. Pečnik B., Wuchterl G. Giant Planet Formation. A First Classification of Isothermal Protoplanetary Equilibria. *Astronomy & Astrophysics*. 2005, vol. 440, p. 1183. DOI: 10.1051/0004-6361:200500005.

Received: January 23, 2023

Accepted: February 14, 2023

#### Author's information:

Evgeniy N. BODUNOV — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department "Physics"; [evgeny.bodunov@inbox.ru](mailto:evgeny.bodunov@inbox.ru)  
Aleksey O. SEMENOV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; [aleksem@mail.ru](mailto:aleksem@mail.ru)

УДК 658.382

## Разработка новых геозащитных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами для повышения техносферной безопасности

Е. И. Макарова, А. О. Кriuшина

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

**Для цитирования:** Макарова Е. И., Кriuшина А. О. Разработка новых геозащитных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами для повышения техносферной безопасности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 110–119. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-110-119

### Аннотация

**Цель:** Разработка новых строительных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, позволяющих изолировать отходы разной природы. **Методы:** Химические методы анализа; экспериментальные исследования в лабораторных условиях; физико-механические методы, статистические методы. **Результаты:** Получен новый строительный материал, обладающий геозащитными свойствами, содержащий отработанные замасленные бумажные фильтры, образующиеся при обслуживании подвижного состава. Получен новый строительный материал, обладающий геозащитными свойствами, содержащий отработанные кислотные электролиты аккумуляторных батарей. Определены оптимальные составы новых материалов. Показано, что допустимое количество отработанных замасленных бумажных фильтров, вводимых в вяжущую смесь, составляет 10 %, а отработанного кислотного электролита — 25 %. **Практическая значимость:** Показана возможность получения нового строительного материала, обладающего геозащитными свойствами, содержащего отработанные замасленные бумажные фильтры, отработанные кислотные электролиты аккумуляторных батарей. Определены эксплуатационные и геозащитные характеристики полученных строительных материалов.

**Ключевые слова:** Строительный материал, геозащитные свойства, отработанные замасленные бумажные фильтры, отработанный кислотный электролит аккумуляторных батарей, отходы, защита окружающей среды, техносферная безопасность.

### Введение

В современных условиях развития цивилизации проблема техносферной безопасности становится особенно актуальной. Расширение границ крупнейших мегаполисов, освоение новых территорий, стремительный рост темпов строительства, развитие промышленных предприятий и новых транспортных сообщений, увеличение пассажиропотоков и грузоперевозок — все это неизбежно приводит к образованию значительного количества отходов разной природы. В соответствии с [1]

основными мероприятиями по обращению с отходами в Российской Федерации являются утилизация, обезвреживание и размещение отходов.

Из официальных источников [2, 3] известно, что объемы образующихся отходов постоянно увеличиваются (рис. 1), при этом объемы утилизированных и обезвреженных отходов значительно меньше (рис. 2). Основным направлением решения данной проблемы является введение в эксплуатацию новых объектов обращения с отходами (рис. 3, 4) [3].

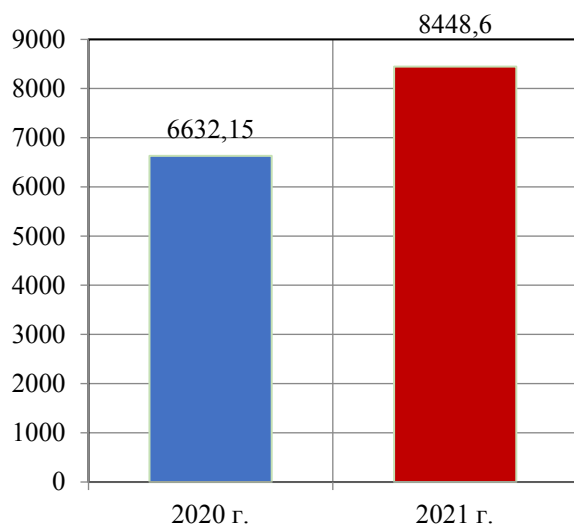


Рис. 1. Объемы образующихся отходов, млн т, в 2020 и 2021 гг.

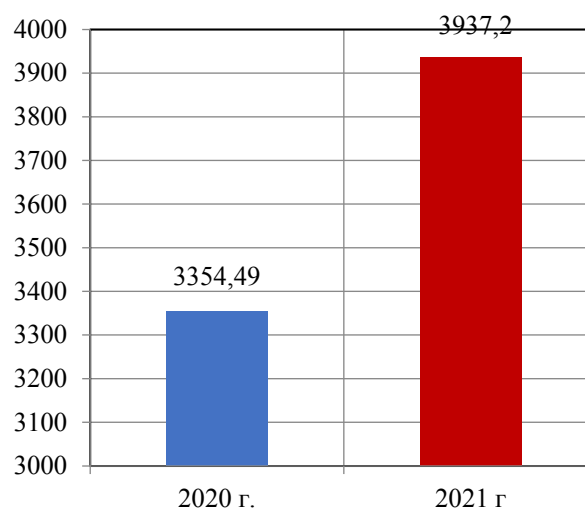


Рис. 2. Объемы обезвреженных отходов, млн т, в 2020 и 2021 гг.

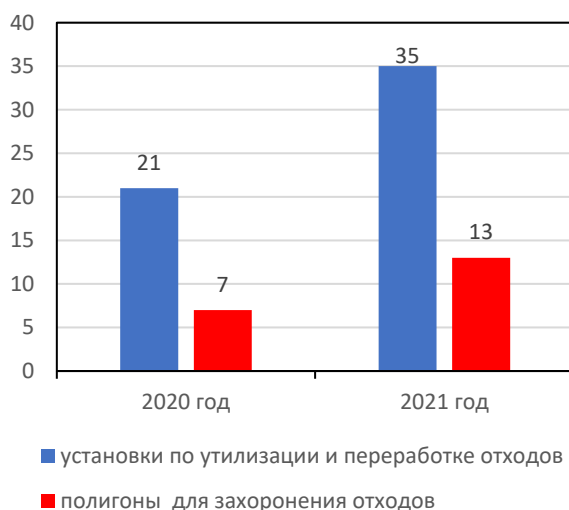


Рис. 3. Новые объекты обращения с отходами

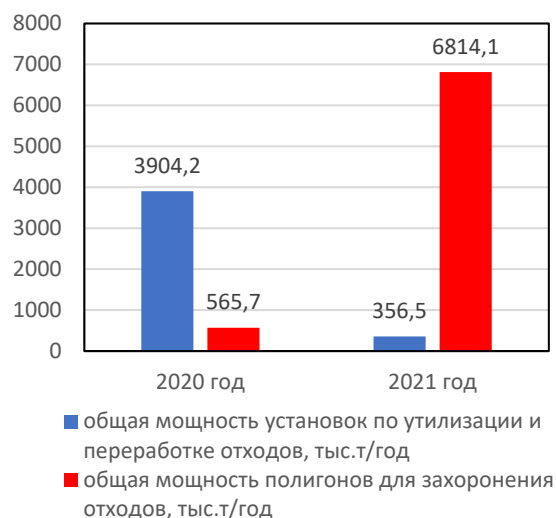


Рис. 4. Мощность новых объектов обращения с отходами

Таким образом, несмотря на прогресс в области защиты окружающей среды, проблема обращения с отходами разной природы остается актуальной и требует новых подходов и решений.

При разработке способов изоляции отходов от окружающей среды необходимо учитывать, что в современных условиях наиболее рациональным является использование отходов в качестве сырья для получения новых, безопасных продуктов.

В этой связи наиболее привлекательными будут технологии получения строительных материалов, которые позволят одновременно сочетать решение проблем техносферной и экологической безопасности.

Таким образом, цель работы заключалась в разработке новых строительных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, позволяющими изолировать отходы разной природы.

ТАБЛИЦА 1. Отходы, выбранные в качестве объектов исследования

| № п. п. | Название отхода                                          | Основной загрязнитель                 | Величина удельного показателя |
|---------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1       | Отработанные замасленные бумажные фильтры                | Нефтепродукты                         | 0,3 кг/фильтр                 |
| 2       | Отработанный кислотный электролит аккумуляторных батарей | Серная кислота, ионы тяжелых металлов | 8,5 кг/аккумулятор            |

ТАБЛИЦА 2. Химический состав отработанного кислотного электролита аккумуляторных батарей

| Состав, %                      |                  |                   |                  |     |
|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-----|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> O | PbSO <sub>4</sub> | PbO <sub>2</sub> | PbS |
| 28,9                           | 13,3             | 27,7              | 26,8             | 3,3 |

### Объекты исследования

В качестве объектов исследования выбраны отходы железнодорожного транспорта, образующиеся при ремонте и обслуживании подвижного состава, содержащие нефтепродукты (отработанные замасленные бумажные фильтры), кислоты и ионы тяжелых металлов (отработанный кислотный электролит аккумуляторных батарей) (табл. 1).

Химический состав отработанного кислотного электролита аккумуляторных батарей представлен в табл. 2.

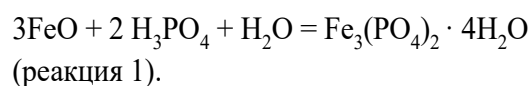
### Разработка метода получения нового строительного материала, обладающего геозащитными свойствами

Метод получения нового строительного материала, обладающего геозащитными свойствами, базируется на построении концептуальной модели, данных, полученных при экспериментальных исследованиях, разработке математических моделей, определении оптимально допустимого количества вводимого отхода, разработке технологического решения производства нового строительного материала, обладающего геозащитными свойствами (рис. 5).

При разработке нового строительного материала учитывалось, что в настоящее время особенно остро встает проблема получения строительных материалов, не содержащих силикаты кальция, имеющих высокие прочностные характеристики

и способных надежно изолировать отходы. Объясняется это тем, что получение цементных строительных материалов, содержащих нефтезагрязнения, кислоты и тяжелые металлы, не представляется возможным.

Таким образом, для надежной изоляции отходов необходимы специальные вяжущие. По совокупности признаков наиболее подходящим в данном случае является фосфатный материал, содержащий глину, песок, основной оксид и ортофосфорную кислоту [4–8, 10]. Основой твердения фосфатной системы является процесс получения труднорастворимых (произведение растворимости  $PP = 1,3 \cdot 10^{-22}$  [9]) фосфатов железа (II) по реакции 1.



Процесс твердения является экзотермическим, выделяющаяся энергия способствует дегидратации системы и кристаллизации продуктов. Образующиеся в результате реакции фосфаты безопасны для окружающей среды.

### Результаты экспериментальных исследований

В работах Л. Б. Сватовской, Е. И. Макаровой, М. Н. Латутовой, Е. В. Крюковой, Е. В. Бенза и др. [4, 10–18] доказано, что присутствие в составе фосфатного вяжущего отходов разной природы

не является препятствием к получению строительного материала с улучшенными эксплуатационными свойствами, а следовательно, фосфатная система может быть использована для изоляции отходов, проявляя при этом геозащитные свойства. Кроме того, замена товарных продуктов системы на отходы позволяет существенно снизить затраты на производство материала.

Базируясь на данных, описанных в работах [4, 10, 17], для производства нового строительного материала использовались: кислотный гальванический отход, содержащий ионы тяжелых металлов (табл. 3), и отход, содержащий оксид железа (II) (табл. 4).

Для приготовления нового строительного материала, обладающего геозащитными свойствами и способного надежно изолировать отходы, определены составы 1 и 2.

Состав 1: глина кембрийская, песок, отход, содержащий оксид железа (II), отработанные замасленные бумажные фильтры, в качестве жидкости затворения — отход гальванического производства.

Состав 2: глина кембрийская, песок, отход, содержащий оксид железа (II), в качестве жидкости затворения — отход гальванического производства, содержащий дополнительно 25 %



Рис. 5. Метод получения нового строительного материала, обладающего геозащитными свойствами

ТАБЛИЦА 3. Содержание ионов тяжелых металлов в гальваническом отходе и их предельно допустимые концентрации в водных объектах (ПДК<sub>рх</sub>)

| Содержание ионов металлов в гальваническом отходе, мг/л / ПДК <sub>рх</sub> |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Fe <sup>2+</sup>                                                            | Mn <sup>2+</sup> | Ni <sup>2+</sup> | Cr <sup>3+</sup> | Cu <sup>2+</sup> |
| 4400/0,3                                                                    | 500/0,1          | 3/0,1            | 32000/0,05       | 8960/1,0         |

ТАБЛИЦА 4. Химический состав отхода, содержащего оксид железа (II), % [17]

|                                |     |                                |      |     |      |
|--------------------------------|-----|--------------------------------|------|-----|------|
| FeO                            | 96  | SiO <sub>2</sub>               | 2    | CuO | 0,1  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,4 | MnO                            | 0,8  | NiO | 0,2  |
| Mo <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 0,1 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,04 | C   | 0,3  |
| WO <sub>2</sub>                | <   | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,3  | S   | 0,03 |
| CaO                            | <   | TiO <sub>2</sub>               | J    | MgO | J    |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | <   | Влага гигроскопическая         |      |     | 0,06 |

ТАБЛИЦА 5. Эксплуатационные свойства новых строительных материалов, обладающих геозащитными свойствами

| № п. п.      | Содержание компонентов, % |       |            |                      | Прочность при сжатии, МПа | Морозостойкость, циклов, не менее |
|--------------|---------------------------|-------|------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|              | глина                     | песок | FeO        | отработанные фильтры |                           |                                   |
| Состав 1     | 40                        | 40    | 10 (отход) | 10                   | 38,7                      | 35                                |
| Состав 2     | 45                        | 45    | 10 (отход) | —                    | 39,5                      | 35                                |
| Состав 3 (К) | 45                        | 45    | 10         | —                    | 29,2                      | 35                                |

Примечание: (К) — контрольный состав.

отработанного кислотного электролита аккумуляторных батарей.

Сравнение эксплуатационных свойств, новых материалов проводилось с контрольным составом (состав 3): глина кембрийская (45,0 %), песок (45,0 %) и FeO (10 %), жидкость затворения — ортофосфорная кислота плотностью 1,26 г/см<sup>3</sup>.

Исследования показали, что после отвердевания образцы имеют прочность и морозостойкость выше, чем у контрольного образца (табл. 5).

Оптимальное содержание отработанных замасленных фильтров в материале составляет 10 %, при этом прочность затвердевшего образца на 56 сутки составляет 38,7 МПа, а морозостойкость — не менее 35 циклов.

Исследования эксплуатационных свойств материалов, полученных из состава 2, показали, что максимальное содержание отработанного кислотного электролита аккумуляторных батарей не должно превышать 25 % от жидкой части, при этом затвердевшие образцы имеют прочность при сжатии не менее 39,5 МПа, а морозостойкость не менее 35 циклов. При этом в соответствии с данными, полученными Е. В. Крюковой [18], с течением времени следует ожидать значительного увеличения прочности фосфатной системы, а следовательно, и сохранения геозащитных свойств, которые подтверждаются физико-химическими исследованиями образцов материалов, полученных на базе составов 1 и 2.

### Рекомендации по применению новых строительных материалов, обладающих геозащитными свойствами

Повышенные эксплуатационные характеристики нового материала, обладающего геозащитными свойствами, позволяют рекомендовать его к использованию в условиях отрицательных температур, например для укрепления грунтов или для строительства специальных сооружений, в том числе и геозащитных. В качестве таких сооружений могут быть рассмотрены могильники, внутри которых размещаются отходы. Применение цементных систем в условиях отрицательных температур затруднительно, поэтому предлагается производить заливку стенок могильника из полученных материалов, обладающих геозащитными свойствами.

### Производство нового строительного материала, обладающего геозащитными свойствами

Технологическая схема производства строительного материала, обладающего геозащитными свойствами, представлена на рис. 6 [10].

### Основные выводы

Получен новый строительный материал, обладающий геозащитными свойствами, содержащий отработанные замасленные бумажные фильтры, образующиеся при обслуживании подвижного состава. А также получен новый строительный

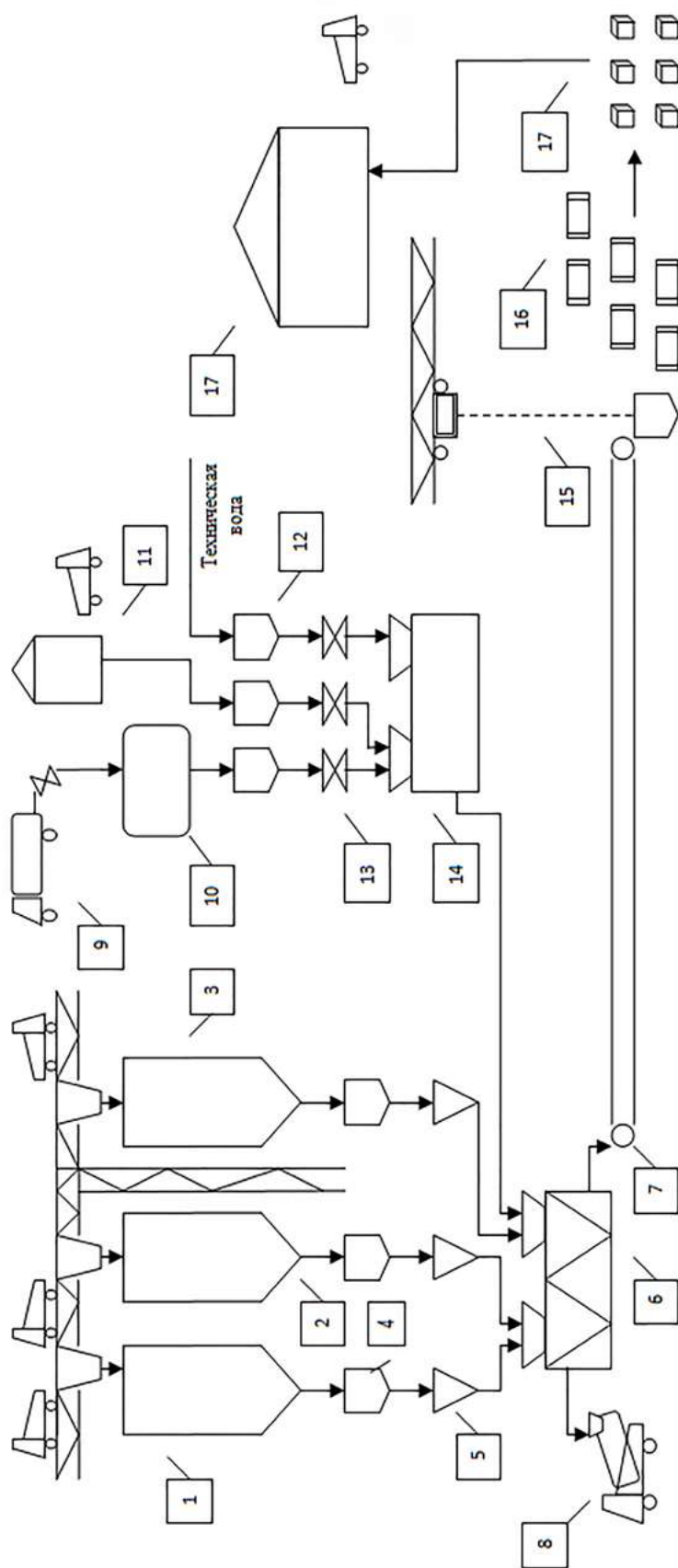


Рис. 6. Схема производства строительного материала, обладающего геозащитными свойствами:

1 — емкость для хранения глины кембрийской; 2 — емкость для хранения отходов, подлежащих изоляции; 3 — емкость для хранения отхода, содержащего оксид железа (II); 4 — расходные бункеры сухих компонентов систем; 5 — дозаторы сухих компонентов систем; 6 — смеситель для перемешивания компонентов систем; 7 — транспортер; 8 — автобетоносмеситель; 9 — автотранспорт для перевозки отхода гальванического производства; 10 — емкость отхода гальванического производства; 11 — емкость отработанного кислотного электролита аккумуляторных батарей; 12 — расходные бункеры жидких компонентов систем; 13 — дозаторы жидких компонентов систем; 14 — смеситель для перемешивания жидких компонентов систем; 15 — заливка вяжущей смеси в формы для производства новых строительных материалов, обладающих геозащитными свойствами; 16 — распалубка полученных строительных материалов, обладающих геозащитными свойствами; 17 — склад для хранения готовой продукции

материал, обладающий геозащитными свойствами, содержащий отработанный электролит аккумуляторных батарей.

Установлено, что новые строительные материалы, обладающие геозащитными свойствами и полученные с использованием отходов, имеют прочность и морозостойкостью больше, чем у контрольного состава.

Показано, что полученные материалы обладают геозащитными свойствами и способны надежно изолировать отходы.

Полученные новые строительные материалы, обладающие геозащитными свойствами, имеют широкий спектр применения и могут использоваться для повышения техносферной безопасности, например при строительстве специальных сооружений или при укреплении грунтов.

### Библиографический список

1. Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления».
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. — 864 с.
3. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. — 685 с.
4. Сватовская Л. Б. Новые экозащитные технологии на железнодорожном транспорте: монография / Л. Б. Сватовская, Е. И. Макарова, А. М. Сычева и др.; под ред. Л. Б. Сватовской. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. — 159 с.
5. Сватовская Л. Б. Параметры применимости процессов искусственного камнеобразования для защиты окружающей среды / Л. Б. Сватовская, Е. И. Макарова, М. С. Старинец // Наука и техника транспорта. — 2007. — № 4. — С. 30–36.
6. Копейкин В. А. Фосфатные материалы в строительстве / В. А. Копейкин // Центральный институт научной информации по строительству и архитектуре Госстроя СССР. — М., 1978. — 31 с.
7. Макарова Е. И. Новые технологии утилизации гальванических отходов / Е. И. Макарова // Новые исследования в материаловедении и экологии: сб. науч. ст. под ред. Л. Б. Сватовской. — СПб.: ПГУПС, 2004. — Вып. 4. — С. 50–52.
8. Сватовская Л. Б. Новые комплексные технологии защиты окружающей среды на транспорте: монография / Л. Б. Сватовская, Е. И. Макарова, Н. И. Якимова; под ред. Л. Б. Сватовской. — СПб.: ПГУПС, 2005. — 71 с.
9. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. — М., 1979. — С. 92–101.
10. Макарова Е. И. Научные основы защиты окружающей среды при ликвидации, обезвреживании и блокировании загрязнений железнодорожного транспорта: дисс. ... д-ра техн. наук / Е. И. Макарова. — М.: МИИТ, 2012. — 562 с.
11. ЛатUTOва М. Н. Новые фосфатные материалы со специальными свойствами / М. Н. ЛатUTOва, Е. И. Макарова, М. С. Старинец и др. // Цемент и его применение. — 2006. — № 3. — С. 73–75.
12. Макарова Е. И. Использование новых технологий для защиты биосферы от вредных воздействий / Е. И. Макарова, Е. В. Бенза // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. — 2005. — № 3. — С. 37–41.
13. Сватовская Л. Б. Использование отходов транспорта для создания строительных материалов нового поколения / Л. Б. Сватовская, Е. И. Макарова, Н. И. Якимова // Наука и техника транспорта. — 2005. — № 1. — С. 38–43.
14. Сватовская Л. Б. Утилизация отходов, содержащих ионы тяжелых металлов и нефтепродукты / Л. Б. Сватовская, Е. И. Макарова, М. Н. ЛатUTOва и др. // Экология и промышленность России. — 2009. — С. 22–25.
15. Макарова Е. И. Комплексная технология утилизации отходов транспорта / Е. И. Макарова, Е. В. Бенза, Н. И. Якимова // Экологическая безопасность регионов России и риск от техногенных аварий и катастроф: матер. Всероссийского постоянно действующего научно-технич. семинара. — Пенза: РИО ПГСХА, 2004. — С. 112–114.
16. Сватовская Л. Б. Инженерно-химические основы прогнозирования геозащитных свойств твердых



тел и новых технологий обезвреживания: монография / Л. Б. Сватовская, М. В. Шершнева, А. М. Сычева и др.; под ред. Л. Б. Сватовской. — СПб.: ПГУПС, 2010. — 78 с.

17. Сватовская Л. Б. Комплексные технологии утилизации отходов железнодорожного транспорта: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / Л. Б. Сватовская, Л. Л. Масленникова, Е. И. Макарова и др.; под ред. Л. Б. Сватовской. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. — 190 с.

18. Крюкова Е. В. Получение и свойства новых экозащитных фосфатных материалов для транспортного строи-

тельства: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Е. В. Крюкова. — СПб.: ПГУПС, 2004. — 24 с.

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 13.02.2023

#### Контактная информация:

МАКАРОВА Елена Игоревна —

д-р техн. наук, профессор;

4578097@mail.ru

КРИУШИНА Александра Олеговна —

аспирант;

kriushina@pgups.ru

## Development of New Geo-Protective Materials with Improved Exploitational Properties for Technosphere Safety Rise

E. I. Makarova, A. O. Kriushina

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

**For citation:** Makarova E. I., Kriushina A. O. Development of New Geo-Protective Materials with Improved Exploitational Properties for Technosphere Safety Rise // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 110–119. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-110-119

### Summary

**Purpose:** Development of new building materials with improved exploitational properties allowing to isolate various nature waste. **Methods:** Chemical methods of analysis; experimental research in laboratory conditions; physical-mechanical methods, statistical methods. **Results:** New building material, possessing geo-protective properties, has been obtained which contains outgoing oily paper filters formed during a rolling stock maintenance. New building material with geo-protective properties has been obtained containing outgoing acid electrolytes of batteries. Optimal compositions of new materials have been determined. It's been shown that the allowable amount of outgoing oily paper filters, being introduced into binding mixture, constitutes 10%, and the amount of outgoing acid electrolyte — 25%. **Practical significance:** The possibility of obtaining new building material with geo-protective properties that contains outgoing oily paper filters, outgoing acid electrolytes of batteries is shown. Exploitational and geo-protective characteristics of obtained building materials have been defined.

**Keywords:** Building material, geo-protective properties, outgoing oily paper filters, outgoing acid battery electrolyte, waste, environmental protection, technosphere safety.

## References

1. *Federal'nyy zakon ot 24 iyunya 1998 g. № 89 FZ "Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya"* [Federal Law of June 24, 1998 № 89FZ "On Production and Consumption Waste"]. (In Russian)
2. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu. Gosudarstvennyy doklad* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report]. Moscow: Minprirody Rossii; MGU imeni M. V. Lomonosova Publ., 2021, 864 p. (In Russian)
3. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu. Gosudarstvennyy doklad* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021. State report]. Moscow: Minprirody Rossii; MGU imeni M. V. Lomonosova Publ., 2022, 685 p. (In Russian)
4. Svatovskaya L. B., Makarova E. I., Sycheva A. M. et al. *Novye ekozashchitnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: monografiya; pod red. L. B. Svatovskoy* [New environmental protection technologies in railway transport: monograph; ed. L. B. Svatovskaya]. Moscow: GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2007, 159 p. (In Russian)
5. Svatovskaya L. B., Makarova E. I., Starinets M. S. Parametry primenimosti protsessov iskusstvennogo kamneobrazovaniya dlya zashchity okruzhayushchey sredy [Parameters of applicability of artificial stone formation processes for environmental protection]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2007, Iss. 4, pp. 30–36. (In Russian)
6. Kopeikin V. A. Fosfatnye materialy v stroitel'stve [Phosphate materials in construction]. *Tsentral'nyy institut nauchnoy informatsii po stroitel'stvu i arkhitekture Gosstroya SSSR* [Central Institute of Scientific Information on Construction and Architecture of the Gosstroy of the USSR]. Moscow, 1978, 31 p. (In Russian)
7. Makarova E. I. *Novye issledovaniya v materialovedenii i ekologii: sb. nauch. St. pod red. L. B. Svatovskoy* [New technologies for the utilization of galvanic waste]. *Novye issledovaniya v materialovedenii i ekologii: sb. nauch. St. pod red. L. B. Svatovskoy* [New research in materials science and ecology: coll. scientific; ed. L. B. Svatovskoy]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2004, Iss. 4, pp. 50–52. (In Russian)
8. Svatovskaya L. B., Makarova E. I., Yakimova N. I. et al. *Novye kompleksnye tekhnologii zashchity okruzhayushchey sredy na transporte: monografiya; pod red. L. B. Svatovskoy* [New integrated technologies for environmental protection in transport: monograph; ed. L. B. Svatovskaya]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2005, 71 p. (In Russian)
9. Lurie Yu. Yu. *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Handbook of analytical chemistry]. Moscow, 1979, pp. 92–101. (In Russian)
10. Makarova E. I. *Nauchnye osnovy zashchity okruzhayushchey sredy pri likvidatsii, obezvrezhivanii i blokirovani zagryazneniy zheleznodorozhnogo transporta: dlss. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific foundations of environmental protection during the elimination, neutralization and blocking of pollution of railway transport: dlss. ... of doctor of tech. sciences]. Moscow: MIIT Publ., 2012, 562 p. (In Russian)
11. Latutova M. N., Makarova E. I., Starinets M. S. et al. *Novye fosfatnye materialy so spetsial'nymi svoystvami* [New phosphate materials with special properties]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its application]. 2006, Iss. 3, pp. 73–75. (In Russian)
12. Makarova E. I., Benza E. V. *Ispol'zovanie novykh tekhnologiy dlya zashchity biosfery ot vrednykh vozddeystviy* [The use of new technologies to protect the biosphere from harmful effects]. *Vestnik obrazovaniya i razvitiya nauki Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk* [Bulletin of Education and Science Development of the Russian Academy of Natural Sciences]. 2005, Iss. 3, pp. 37–41. (In Russian)
13. Svatovskaya L. B., Makarova E. I., Yakimova N. I. *Ispol'zovanie otkhodov transporta dlya sozdaniya stroitel'nykh materialov novogo pokoleniya* [The use of transport waste to create a new generation of building materials]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2005, Iss. 1, pp. 38–43. (In Russian)
14. Svatovskaya L. B., Makarova E. I., Latutova M. N. et al. *Utilizatsiya otkhodov, sodержashchikh iony tyazhely-*

kh metallov i nefteprodukty [Utilization of waste products containing heavy metal ions and oil products]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2009, pp. 22–25. (In Russian)

15. Makarova E. I., Benza E. V., Yakimova N. I. *Kompleksnaya tekhnologiya utilizatsii otkhodov transporta. Ekologicheskaya bezopasnost' regionov Rossii i risk ot tekhnogennykh avariya i katastrof: mater. Vserossiyskogo postoyanno deystvuyushchego nauchno-tekhnich. seminar* [Integrated technology for the disposal of transport waste. Ecological safety of the regions of Russia and the risk of man-made accidents and catastrophes: materials All-Russian permanent scientific and technical seminar]. Penza: RIO PGSKhA Publ., 2004, pp. 112–114. (In Russian)

16. Svatovskaya L. B., Shershneva M. V., Sycheva A. M. et al. *Inzhenerno-khimicheskie osnovy prognozirovaniya geozashchitnykh svoystv tverdykh tel i novykh tekhnologiy obezvezhivaniya: monografiya* [Engineering and chemical foundations for predicting the geoprotective properties of solids and new technologies for neutralization: monographed]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2010, 78 p. (In Russian)

17. Svatovskaya L. B., Maslennikova L. L., Makarova E. I. *Kompleksnye tekhnologii utilizatsii otkhodov zheleznodoro-*

*zhnogo transporta: uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta; ed. L. B. Svatovskaya* [Integrated technologies for the disposal of railway waste: a textbook for universities of the railway. transport]. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte” Publ., 2007, 190 p. (In Russian)

18. Kryukova E. V. *Poluchenie i svoystva novykh ekoza-shchitnykh fosfatnykh materialov dlya transportnogo stroitel'stva: avtoref. dlss. ... kand. tekhn. nauk* [Obtaining and properties of new eco-protective phosphate materials for transport construction: abstract dlss. ... cand. tech. sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2004, 24 p. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 13, 2023

#### Author's information:

Elena I. MAKAROVA —

Dr. Sci. in Engineering, Professor;

4578097@mail.ru

Alexandra O. KRIUSHINA —

Postgraduate Student;

kriushina@pgups.ru

УДК 004:378

## Иммерсивные технологии в высшем образовании

Д. Давыдова, Г. Р. Гильванов, Я. В. Кукушкина, И. Ю. Романова

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

**Для цитирования:** Давыдова Д., Гильванов Г. Р., Кукушкина Я. В., Романова И. Ю. Иммерсивные технологии в высшем образовании // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 120–132. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-120-132

### Аннотация

**Цель:** Изучение влияния иммерсивных технологий на современное образование; анализ виртуальной, дополненной и смешанной реальностей. **Методы:** Сравнение традиционного образования и образования с использованием иммерсивных технологий и анализ литературы, посвященной предмету исследования. **Результаты:** Раскрывается значимость иммерсивных технологий в высшем образовании, позволяющих расширять возможности удаленного взаимодействия между людьми. **Практическая значимость:** Показана возможность использования иммерсивных технологий в образовательной среде с целью визуализации учебного материала.

**Ключевые слова:** Виртуальная реальность, дополненная реальность, смешанная реальность, современное образование, информационные технологии.

### Введение

В данной статье анализируется возможность применения иммерсивных технологий в высшем образовании, излагается мнение авторов о возможности их применения на примере высшего транспортного образования. Как известно, основная цель получения образования — это возможность приобщения обучающегося к достижениям общества, выявление его индивидуальных способностей, развитие этих способностей, привитие навыков самостоятельной работы, что в итоге будет делать его социально активным и полезным на благо общества. Указанное невозможно без поиска способов, наиболее просто объясняющих сложные явления и процессы по различным предметам обучения.

Множество информационных технологий, используемых в целях интерпретации обучающимся сложного материала, демонстрируют свою неэффективность, что приводит лишь к частичному усвоению материала обучающимися [1]. Воз-

никает задача периодического поиска и обновления стилей, методов и форм преподавания. Исходя из этого, актуальным и новым подходом к обучению является использование иммерсивных технологий. Такой подход позволяет не просто использовать систему сложившихся механизмов в ходе решения задач, но и выстраивать представление о среде, в которой ему предстоит действовать [2]. Рассмотрение иммерсивности как одного из способов восприятия, создающего эффект погружения в искусственно созданную среду, позволило искать методы такого погружения. Отсюда возникло направление — иммерсивные технологии. В настоящее время используются такие иммерсивные технологии, как технологии виртуальной, дополненной и смешанной реальности [3, 4]. В пользу применения иммерсивных технологий говорит тот факт, что окружающий нас информационный мир меняется с небывалой скоростью. Вторым фактом является перевод вузов вследствие появления

коронавирусной инфекции на применение дистанционной формы обучения. В этих условиях стало понятно, что удаленная передача посредством текстовой, аудио- и видеоинформации катастрофически недостаточна для эффективного усваивания материала обучающимися [5].

### **Применение иммерсивных технологий в образовании. Применение технологии дополненной реальности в образовании**

Дополненная реальность (AR — augmented reality — «добавленная») — это технология, позволяющая в режиме реального времени интегрировать виртуальные объекты в реальный мир, применяя различные технические устройства, такие как планшеты, смартфоны и др., которые визуальнo дополняют физический мир. Другими словами, обучающийся видит то, чего не существует в реальном мире. Виртуальную среду создают путем внедрения оцифрованных объектов на видеосигнал, поступающий с видеокамеры, и она становится интерактивной за счет применения специальных маркеров [6–8].

Технологии дополненной реальности классифицируются по следующим направлениям, представленным в табл. 1.

Технология AR позволяет осуществлять воспроизведение различных процессов в реальных размерах и возможностях, не подлежащих воссозданию в условиях реального мира, что может регенерировать процесс обучения для визуального восприятия необходимой информации, а также сделать учебный процесс увлекательным и понятным. С применением технологий

дополненной реальности обучающимся представляются широкие возможности управления виртуальными объектами, их перемещения и изменения их положения в реальном пространстве, изменения масштаба, обзора со всех сторон. Все это позволяет обучающимся развивать пространственное мышление и воспринимать изучаемый предмет полнее и глубже. Для педагога очень важно привить обучающемуся желание получать новые знания, для этого ему необходимо вызвать интерес к предмету. Этой цели можно достичь с помощью AR-технологии [9, 10].

Дополненная реальность позволяет эффективнее организовать учебный процесс. Преимущества и недостатки AR-технологии в образовании приведены в табл. 2.

Анализ достоинств и недостатков свидетельствует о том, что технология AR обладает рядом преимуществ перед традиционным обучением, поскольку посредством дополненной реальности происходит передача опыта и картинки, что позволяет повысить эффективность вовлечения обучающихся в учебный процесс.

### **Применение технологии виртуальной реальности в образовании**

Виртуальная реальность (VR — virtual reality) — это искусственный мир, полностью смоделированный цифровыми технологиями. Подразделяется на 3D или 360° сцены, это также звук (дополняет виртуальность и создает эффект присутствия за счет имитации отражения и направления звуковых волн), тактильные ощущения и даже запахи [1, 11, 12].

ТАБЛИЦА 1. Типы классификации дополненной реальности

| По представлению информации | По способу получения информации | По степени мобильности | По способу взаимодействия |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Визуальные                  | Геопозиционные                  | Стационарные           | Автономные                |
| Аудио                       | Оптические                      | Мобильные              | Интерактивные             |
| Аудиовизуальные             |                                 |                        |                           |

ТАБЛИЦА 2. Преимущества и недостатки AR-технологии в образовании

| Преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Практико-ориентированное обучение.</p> <p>Индивидуальное обучение.</p> <p>Расширение возможностей моделирования нетипичных образовательных задач.</p> <p>Лаконичность и наглядность образовательного контента.</p> <p>Расширение представлений о происходящих процессах в окружающем мире.</p> <p>Повышение мотивации и заинтересованности обучающихся в изучаемом процессе.</p> <p>Дает чувство реальности.</p> <p>Дает практический опыт.</p> <p>Визуализирует сложные отношения.</p> <p>Дает опыт, который нельзя получить в реальной жизни.</p> <p>Конкретизирует абстрактные понятия.</p> <p>Обеспечивает безопасную учебную среду.</p> <p>Экономит время и пространство.</p> <p>Обеспечивает непрерывность обучения.</p> <p>Улучшает коммуникации.</p> <p>Запускает творческие процессы.</p> <p>Развивает воображение</p> | <p>Недостаток опыта работы с AR-проектами .</p> <p>Быстро меняющийся рынок IT-устройств.</p> <p>Технические ограничения цифровых устройств .</p> <p>Отсутствие у части студентов мобильных телефонов и планшетов.</p> <p>Зависимость успеха распознавания маркера от интенсивности освещения, величины угла наклона камеры.</p> <p>Методическая неподготовленность педагогов к применению AR-технологии в образовании .</p> <p>Высокий уровень финансовых затрат.</p> <p>Отсутствие единой образовательной платформы.</p> <p>Приложения могут интерпретировать только двухмерное изображение.</p> <p>Усложнение процесса формирования универсального инструмента считывания информации в связи с разнообразием приложений</p> |

Технологии дополненной реальности можно классифицировать по следующим направлениям, представленным в табл. 3, и свойствам, представленным в табл. 4.

Основным отличием виртуальной реальности от дополненной реальности является полное погружение человека в искусственный мир, который смоделирован компьютерной графикой.

Особенности виртуальной реальности: вовлечение, фокусировка, изоляция [11]. Дадим определение каждому качеству.

Вовлечение — взаимодействие и изменение виртуальной реальности.

Фокусировка — концентрация внимания, концентрация действий и постоянное присутствие в моменте.

Изоляция — самостоятельное режиссирование событий независимо от внешних обстоятельств.

Виртуальное образование — это процесс коммуникативного взаимодействия преподавателя и

обучающегося в виртуальной образовательной сфере с последующим результатом. Такое обучение позволяет полностью погрузиться в учебный процесс при этом не отвлекаться на внешние обстоятельства. Для обучения с использованием VR-технологии используют очки виртуальной реальности, манипуляторы и наушники. Для передачи информации используют картинку совместно со звуковой записью [13].

Технология виртуальной реальности погружает обучающихся в «виртуальное пространство», концентрируя их внимание на изучение того или иного процесса, например химической реакции, электропроводности полупроводников, какой-либо темы. Так, изучая химическое уравнение с помощью VR-технологии, учащийся может попасть внутрь химической реакции и наблюдать за соединением ее частиц. Применение данной технологии в обучении дает практический опыт, уменьшает влияние отвлекающих факторов, позволяет преподавателю объяснить слож-

ТАБЛИЦА 3. Классификация виртуальной реальности

| Тип эффекта                                             | «Полное погружение»                                                                                                                 | «Без погружения»                                                                                                                                                                | «Интегрированная среда»                                                                        | «Интернет-поддержка»                                                                                               |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Характеристика виртуальной реальности                   | Реалистичность имитации реального мира, наличие высокой детализации и прорисовка пространства                                       | «Имитация реального мира», имеет довольно четкое изображение, звук, оснащается контроллерами и широкоформатными экранами                                                        | Виртуальный мир без «эффекта присутствия», отсутствует полнота погружения пользователя в среду | Виртуальный мир в Интернете на основе инструментария Virtual Reality Markup Language и иные решения в формате HTML |
| Особенности аппаратно-программного комплекса            | Функционал и аппаратное оснащение ПК позволяет распознавать действия пользователя и реагировать на них в режиме «реального времени» | Функционал и аппаратное оснащение ПК позволяет воссоздавать археологические 3D-реконструкции и формировать модели зданий, создающиеся архитекторами для демонстрации заказчикам | Нет                                                                                            | Нет                                                                                                                |
| Необходимость дополнительного специального оборудования | Специальное оборудование, соединенное с компьютером, которое обеспечивает эффект погружения в процессе исследования среды           | Нет                                                                                                                                                                             | Нет                                                                                            | Нет                                                                                                                |

ТАБЛИЦА 4. Свойства виртуальной реальности

| Тип                    | Характеристика                                                    |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Правдоподобная         | Полное ощущение реальности                                        |
| «Эффект присутствия»   | Вовлечение в виртуальную реальность «мозг + тело пользователя»    |
| Машинно-генерируемая   | Необходимо мощнейшее аппаратно-программное обеспечение реальности |
| Доступная для изучения | Наличие большого детализированного мира                           |
| Интерактивная          | Наличие взаимодействия «пользователь — среда»                     |

ные для понимания явления, поскольку освоить любые навыки намного легче, если изучать их в интерактивной, трехмерной среде. Педагог также становится частью трехмерной виртуальной реальности, дабы обратить внимание обучающихся на детали или объяснить происходящие процессы [14].

Разновидности виртуального обучения: полное погружение в искусственную реальность, без погружения. При полном погружении используется техника, с помощью которой

все происходящее будет казаться реальным. Без погружения в виртуальную реальность подходит для проектной работы, можно оказаться внутри проекта, увидеть все недочеты и исправить их [13].

Средства, используемые для погружения в VR, представлены на рис. 1.

Виртуальная реальность также оказывает положительный эффект на процесс обучения. Преимущества и недостатки данной технологии отражены в табл. 5 [15].



Рис. 1. Аппаратные средства погружения в VR

ТАБЛИЦА 5. Преимущества и недостатки технологии виртуальной реальности

| Преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Наглядность. Позволяет детально рассмотреть процессы, явления и объекты.</p> <p>Сосредоточенность. Отсутствие внешних раздражителей, что всецело позволяет сконцентрироваться на материале.</p> <p>Вовлечение. Наличие возможности запрограммировать и контролировать сценарий процесса обучения .</p> <p>Безопасность. Отсутствие вероятности нанесения вреда обучающимся кому-либо.</p> <p>Эффективность. Результативность обучения с применением VR выше, чем при классическом формате.</p> <p>Геймификация процесса обучения. Значительную часть информации можно подать в игровой форме</p> | <p>Высокая стоимость создания программ под VR.</p> <p>Вероятность возникновения трудностей адаптации к виртуальной реальности.</p> <p>Необходимость вносить изменения в программу обучения .</p> <p>Купленное оборудование для использования виртуальной реальности может устареть в связи с развитием технологий</p> |

Анализ достоинств и недостатков свидетельствует о том, что технология VR имеет больше положительных сторон, что говорит о его преимуществе перед традиционным обучением. На рис. 2 представлены направления образования,

где уже сейчас применяется технология виртуальной реальности.

С большой вероятностью можно сказать, что виртуальные технологии в образовании будут только совершенствоваться и расширяться [15].



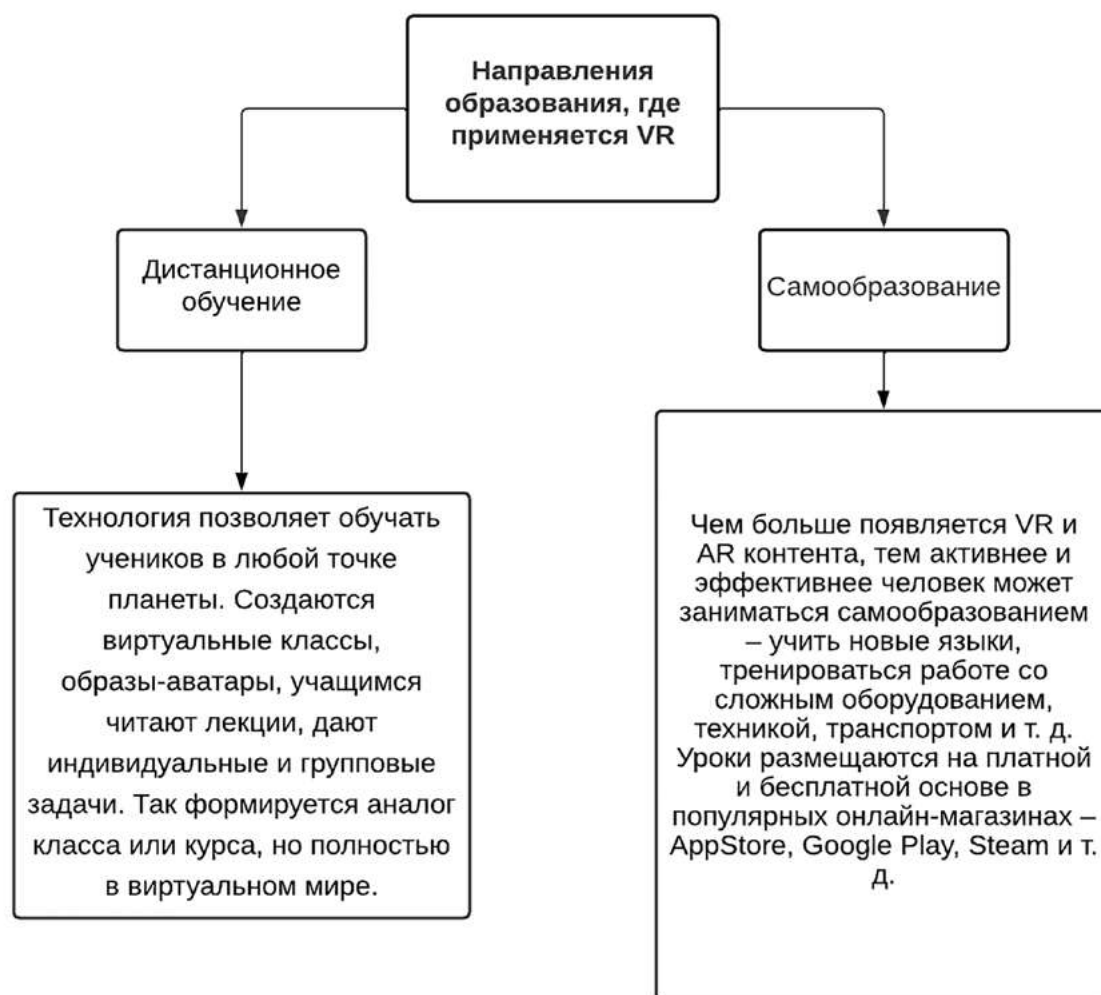


Рис. 2. Схема направлений образования с применением виртуальной технологии

### Применение смешанной реальности в образовании

Смешанная реальность (MR — mixed reality) — реальность, где цифровой мир тесно связан с реальностью, которая является его составляющей. При этом цифровые объекты взаимодействуют и влияют на объекты реального мира. Смешанная реальность — это та же виртуальная реальность с некоторыми дополнениями реальности или дополненная реальность с применением Microsoft HoloLens (очки смешанной реальности, разработанные Microsoft) [16, 17]. На рис. 3 представлена схема смешанной реальности.

Смешанная реальность не так сильно развита, как дополненная или виртуальная реальность. Технология смешанной реальности отличается от дополненной и виртуальной реальности тем, что гарнитура, используемая для MR, непрерывно отображает окружающий мир, объекты и строит их трехмерные модели вокруг пользователя. После этого виртуальные объекты накладываются на объекты реального мира, что позволяет сделать их более информативными. Эта технология открывает перед пользователем множество новых возможностей. С помощью MR у обучающихся имеется возможность легко переключаться между обеими реальностями, так как взаимодей-



Рис. 4. Способы использования MR-технологии

ствие с виртуальным миром осуществляется с помощью гарнитуры и рук [17].

Смешанная реальность применяется во многих сферах нашей жизни, начиная с развлечений и заканчивая обучением. В медицинских вузах все чаще используют симуляционное обучение, основанное на технологии смешанной реальности [16]. Данная технология при правильном использовании поддерживает и расширяет учебную программу, тем самым улучшает результаты обучения, а также делает знания доступными и масштабируемыми.

Рассмотрим способы использования MR-технологии в образовании (рис. 4).

С помощью смешанной реальности учащиеся могут прикасаться к объектам и манипулировать ими, а также лучше понимать каждый из них, взаимодействовать с наборами данных, сложными методами и абстрактными понятиями, которые сложно понять с помощью словесных инструкций учителя. В результате смешанная реальность обеспечивает более увлекательное и

эффективное обучение, чем другие традиционные методы обучения.

Возможности смешанной реальности в образовании:

1. Активное участие. Технология привлекает внимание обучающихся, что повышает вовлеченность всех студентов.
2. Многопрофильность. С помощью смешанной реальности можно преподавать абсолютно любой предмет.
3. Воображение. MR-технология позволяет преподавателям и обучающимся взаимодействовать с историческими местами, изучать животных и строение человека, вернуться в прошлое. Нет никаких ограничений [18–20].

Смешанная реальность дает возможности прикасаться к объектам и манипулировать ими, а также лучше понимать каждый из них, взаимодействовать с наборами данных, сложными методами и абстрактными понятиями.

В дальнейшем применение иммерсивных технологий может осуществляться, напри-

мер, в транспортном вузе при моделировании транспортно-логистических систем любой сложности [21–23], а также при обучении проектированию, нормированию и оценке объектов транспортно-логистической инфраструктуры [24, 25], с применением расчетных методик, предложенных, например, в работах [26–30], а также с учетом трендов цифровой трансформации транспортного комплекса России в целом и железнодорожного транспорта в частности для решения задач обучения сотрудников, повышения клиентоориентированности продуктов, а также обеспечения точности моделирования и прогнозирования [31–36].

## Заключение

В заключение следует отметить, что иммерсивные технологии имеют огромный потенциал в образовании, поскольку они делают предметы интерактивными и более легкими для изучения. Несмотря на новизну в сфере образования, данные технологии показывают впечатляющие результаты. Компания Microsoft провела исследование в университетах, которое показало, что при использовании иммерсивных технологий вовлеченность студентов увеличивается на 35 %. Данные технологии обеспечивают идеальный уровень инноваций в высших учебных заведениях, что делает их будущим Индустрии 4.0.

Таким образом, современной образовательной системе необходимо приспосабливаться к усложняющимся процессам и явлениям, обучающиеся должны научиться пользоваться большим количеством информации и новыми способами ее представления. Для этого следует использовать иммерсивные технологии. По итогам выполненной работы можно заключить, что введение таких технологий, надо полагать, будет способствовать экспоненциальному росту важности и принятия технологий.

## Библиографический список

1. Чайковский Д. С. Использование облачных технологий Google в системе дистанционного обучения вуза / Д. Чайковский // Право, наука, образование: традиции и перспективы: сб. ст. по матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию Саратовской государственной юридической академии (в рамках VII Саратовских правовых чтений, Саратов, 29–30 сентября 2016 г.). — Саратов: ФГБОУ ВО «Саратовская государственная юридическая академия», 2016. — С. 186.
2. Воробьев Д. В. Виртуальная реальность как категория социальной философии, или что такое виртуальная реальность? / Д. В. Воробьев, А. А. Сироткина // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — Серия: Социальные науки. — 2008. — № 4(12). — С. 89–94.
3. Immersive Teaching. Ricerca per l'innovazione della scuola italiana. — URL: <http://www.indire.it/en/progetto/immersive-teaching> (дата обращения: 01.10.2020).
4. Что такое иммерсивные технологии и как их использовать для развития 5G-сервисов. URL: <https://www.it-world.ru/it-news/tech/170439.html> (дата обращения: 15.10.2022).
5. Выборнова А. И. Иммерсивные технологии в телекоммуникациях: обзор и перспективы / А. И. Выборнова // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2021. — Т. 9. — № 3. — С. 1–10. — DOI: 10.31854/2307-1303-2021-9-3-1-10.
6. Дополненная реальность. — URL: <https://sberuniversity.ru/edutech-club/glossary/938/> (дата обращения: 16.10.2022).
7. Технология дополненной реальности AR. — URL: [https://funreality.ru/technology/augmented\\_reality/](https://funreality.ru/technology/augmented_reality/) (дата обращения: 16.10.2022).
8. Дополненная реальность (AR): перспективы и будущее технологии. URL: <https://www.kp.ru/expert/elektronika/dopolnennaya-realnost/> (дата обращения: 16.10.2022).
9. Черкасов К. В. Применение дополненной реальности в образовании / К. В. Черкасов, Н. С. Чистякова, В. В. Чернов // Проблемы педагогики. — 2017. — № 1(24). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/>

primenenie-dopolnennoy-realnosti-v-obrazovanii (дата обращения: 16.10.2022).

10. Таран В. Н. Применение дополненной реальности в обучении / В. Н. Таран // Проблемы современного педагогического образования. — 2018. — № 60-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-dopolnennoy-realnosti-v-obuchanii> (дата обращения: 16.10.2022).

11. Лукашин С. Куда нас погружают иммерсивные технологии / С. Лукашин // Хабр. Блог компании ВТБ, Финансы в IT, AR и VR. — URL: <https://habr.com/ru/company/vtb/blog/463707/> (дата обращения: 16.10.2022).

12. Применение технологий виртуальной реальности для образования, медицины и психологии. — URL: <https://mguu.ru/primenenie-tehnologij-virtualnoj-realnosti-dlya-obrazovaniya-meditsiny-i-psihologii-2/> (дата обращения: 16.10.2022).

13. Виртуальное образование. — URL: <https://hdr360.ru/o-kompanii/virtualnoe-obrazovanie/> (дата обращения: 16.10.2022).

14. Виртуальная реальность в обучении. — URL: <https://webinar.ru/blog/virtualnaya-realnost-v-obuchanii> (дата обращения: 16.10.2022).

15. Виртуальная реальность в образовании. — URL: <https://hsbi.hse.ru/articles/virtualnaya-realnost-v-obrazovanii/> (дата обращения: 16.10.2022).

16. Уваров А. Ю. Технологии виртуальной реальности в образовании // Наука и школа. — 2018. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-virtualnoy-realnosti-v-obrazovanii> (дата обращения: 20.10.2022).

17. Смешанная реальность. — URL: <https://sberuniversity.ru/edutech-club/glossary/903/> (дата обращения: 20.10.2022).

18. How Mixed Reality Helps with Learning In K-12 Classroom. — URL: <https://www.straive.com/blogs/mixed-reality-in-education-how-mixed-reality-helps-with-learning-in-k-12-classroom> (дата обращения: 20.10.2022).

19. Виртуальная и дополненная реальность (VR и AR) — что это? Возможные сферы применения виртуальной и дополненной реальности. Где применяются виртуальная и дополненная реальность. — URL: <https://halzen.ru/more/virtualnaya-i-dopolnennaya-realnost-vr-i-ar->

[chto-eto-vozmozhnye-sfery.html](https://halzen.ru/more/virtualnaya-i-dopolnennaya-realnost-vr-i-ar-chto-eto-vozmozhnye-sfery.html) (дата обращения: 20.10.2022).

20. Зайнуллина М. Р. Использование виртуальной, дополненной и смешанной реальности в образовании / М. Р. Зайнуллина, Я. А. Морозов // Научные труды Центра перспективных экономических исследований. — 2020. — № 19. — С. 62–67.

21. Покровская О. Д. Логистические накопительно-распределительные центры как основа терминальной сети региона: монография / О. Д. Покровская. — Новосибирск, 2012. — 184 с.

22. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.

23. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.

24. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций / О. Д. Покровская // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 2(38). — С. 68–76.

25. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 80–94.

26. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2004. — № 11. — С. 14.

27. Мохонько В. П. Проблемы создания ситуационно-аналитической системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Бюллетень транспортной информации. — 2004. — № 9. — С. 22.

28. Сафронова А. А. Формирование системы финансового менеджмента: теория, опыт, проблемы, перспективы: коллективная монография / А. А. Сафронова, Е. Н. Рудакова, П. В. Куренков и др. — М., 2018. — 228 с.

29. Куренков П. В. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок / П. В. Куренков, С. П. Вакуленко // Экономика железных дорог. — 2012. — № 12. — С. 96.
30. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. — 1998. — № 8.
31. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // РЖД-Партнер. — 2016.
32. Pokrovskaya O. Formation of logistics facilities in transport corridors / O. Pokrovskaya, S. Orekhov, N. Kapustina et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Ser.: VIII International Scientific Conference Transport of Siberia — 2020. — 2020. — P. 012032. — DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012032.
33. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем / О. Д. Покровская // Железнодорожный транспорт. — 2019. — № 7. — С. 26–32.
34. Покровская О. Д. Роботизация и автоматизация складской и транспортной логистики / О. Д. Покровская, Ю. А. Мороз // Техник транспорта: образование и практика. — 2022. — Т. 3. — № 2. — С. 170–175. — DOI: 10.46684/2687-1033.2022.2.170-175.
35. Покровская О. Д. Стенд для исследования динамики и прочности тележки грузового вагона / О. Д. Покровская // Техник транспорта: образование и практика. — 2021. — Т. 2. — № 3. — С. 327–338. — DOI: 10.46684/2687-1033.2021.3.327-338.
36. Шманев Т. М. «Умный вокзал» — система автоматизации вокзального комплекса / Т. М. Шманев, В. И. Ульяницкая, О. Д. Покровская // Техник транспорта: образование и практика. — 2022. — Т. 3. — № 3. — С. 305–311. — DOI: 10.46684/2687-1033.2022.3.305-311.

Дата поступления: 11.01.2023

Решение о публикации: 13.02.2023

#### Контактная информация:

ДАВЫДОВА Даяна — магистрант 2-го курса кафедры «Информационные и вычислительные системы»; dayana-0820@bk.ru

ГИЛЬВАНОВ Ринат Гафганович — канд. воен. наук, доц., доц. кафедры «Информационные и вычислительные системы»; gilvanov1950@mail.ru

КУКУШКИНА Яна Васильевна — канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Управление эксплуатационной работой»; kukushkina@pgups.ru

РОМАНОВА Ирина Юрьевна — канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Управление эксплуатационной работой»; romira-spb@mail.ru

## Immersive Technologies in Higher Education

**D. Davydova, G. R. Gilvanov, Ya. V. Kukushkina, I. Yu. Romanova**

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

**For citation:** Davydova D., Gilvanov G. R., Kukushkina Ya. V., Romanova I. Yu. Immersive Technologies in Higher Education // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 120–132. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-120-132

### Summary

**Purpose:** To study the impact of intensive technologies on modern education; the analysis of virtual, augmented and mixed realities. **Methods:** Comparison of traditional education and education using immersive technologies and analysis of literature devoted to the research subject. **Results:** The importance of immersive technologies in higher education, allowing to expand the possibilities of remote interaction between people, is revealed. **Practical significance:** The possibility of using immersive technologies in educational environment for the purpose of educational material visualization is shown.

**Keywords:** Virtual reality, augmented reality, mixed reality, modern education, informational technologies.

## References

1. Chaykovskiy D. S. *Ispol'zovanie oblačnykh tekhnologiy Google v sisteme distantsionnogo obucheniya vuza. Pravo, nauka, obrazovanie: traditsii i perspektivy: sb. St. po mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 85-letiyu Saratovskoy gosudarstvennoy yuridicheskoy akademii (v ramkakh VII Saratovskikh pravovykh chteniy, Saratov, 29–30 sentyabrya 2016 g.)* [The use of Google cloud technologies in the system of distance learning of the university. Law, science, education: traditions and prospects: Sat. Art. by mother. International scientific-practical. conf., dedicated 85th anniversary of the Saratov State Law Academy (as part of the VII Saratov Legal Readings, Saratov, September 29–30, 2016)]. Saratov: FGBOU VO “Saratovskaya gosudarstvennaya yuridicheskaya akademiya” Publ., 2016, p. 186. (In Russian)
2. Vorob'ev D. V., Sirotkina A. A. Virtual'naya real'nost' kak kategoriya sotsial'noy filosofii, ili chto takoe virtual'naya real'nost'? [Virtual reality as a category of social philosophy, or what is virtual reality?]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Seriya: Sotsial'nye nauki* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N. I. Lobachevsky. Series: Social Sciences]. 2008, Iss. 4(12), pp. 89–94. (In Russian)
3. Immersive Teaching. Ricerca per l'innovazione della scuola italiana. Available at: <http://www.indire.it/en/progetto/immersive-teaching> (accessed: October 1, 2022).
4. Chto takoe immersivnye tekhnologii i kak ikh ispol'zovat' dlya razvitiya 5G-servisov. Available at: <https://www.it-world.ru/it-news/tech/170439.html> (accessed: October 15, 2022).
5. Vybornova A. I. Immersivnye tekhnologii v telekommunikatsiyakh: obzor i perspektivy [Immersive technologies in telecommunications: review and prospects]. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* [Information technologies and telecommunications]. 2021, vol. 9, Iss. 3, pp. 1–10. DOI: 10.31854/2307–1303-2021-9-3-1-10. (In Russian)
6. *Dopolnennaya real'nost'* [Augmented reality]. Available at: <https://sberuniversity.ru/edutech-club/glossary/938/> (accessed: October 16, 2022).
7. Tekhnologiya dopolnennoy real'nosti AR [AR augmented reality technology]. Available at: [https://funreality.ru/technology/augmented\\_reality/](https://funreality.ru/technology/augmented_reality/) (accessed: October 16, 2022).
8. *Dopolnennaya real'nost' (AR): perspektivy i budushchee tekhnologii* [Augmented reality (AR): prospects and future of technology]. Available at: <https://www.kp.ru/expert/elektronika/dopolnennaya-realnost/> (accessed: October 16, 2022).
9. Cherkasov K. V., Chernov V. V. Primenenie dopolnennoy real'nosti v obrazovanii [Application of augmented reality in education]. *Problemy pedagogiki* [Problems of Pedagogy]. 2017, Iss. 1(24). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-dopolnennoy-realnosti-v-obrazovanii> (accessed: October 16, 2022).
10. Taran V. N. Primenenie dopolnennoy real'nosti v obuchenii [Application of augmented reality in education]. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya* [Problems of modern pedagogical education]. 2018, Iss. 60-2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-dopolnennoy-realnosti-v-obuchenii> (accessed: October 16, 2022).
11. Lukashin S. Kuda nas pogruzhayut immersivnye tekhnologii [Where immersive technologies are immersing us]. *Khabr. Blog kompanii VTB, Finansy v IT, AR i VR* [Khabr. VTB company blog, Finance in IT, AR and VR]. Available at: <https://habr.com/ru/company/vtb/blog/463707/> (accessed: October 16, 2022).
12. *Primenenie tekhnologiy virtual'noy real'nosti dlya obrazovaniya, meditsiny i psikhologii* [Application of virtual reality technologies for education, medicine and psychology]. Available at: <https://mguu.ru/primenenie-tehnologij-virtualnoj-realnosti-dlya-obrazovaniya-meditsiny-i-psihologii-2/> (accessed: October 16, 2022).
13. *Virtual'noe obrazovanie* [Virtual education]. Available at: <https://hdr360.ru/o-kompanii/virtualnoe-obrazovanie/> (accessed: October 16, 2022). (In Russian)
14. *Virtual'naya real'nost' v obuchenii* [Virtual reality in education]. Available at: <https://webinar.ru/blog/virtualnaya-realnost-v-obuchenii> (accessed: October 16, 2022).
15. *Virtual'naya real'nost' v obrazovanii* [Virtual reality in education]. Available at: <https://hsbi.hse.ru/articles/>

virtualnaya-realnost-v-obrazovanii/ (accessed: October 16, 2022).

16. Uvarov A. Yu. Tekhnologii virtual'noy real'nosti v obrazovanii [Virtual reality technologies in education]. *Nauka i shkola* [Science and school]. 2018, Iss. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-virtualnoy-realnosti-v-obrazovanii> (accessed: October 20, 2022).

17. *Smeshannaya real'nost'* [Mixed reality]. URL: <https://sberuniversity.ru/edutech-club/glossary/903/> (accessed: October 20, 2022).

18. How Mixed Reality Helps with Learning In K-12 Classroom. Available at: <https://www.straive.com/blogs/mixed-reality-in-education-how-mixed-reality-helps-with-learning-in-k-12-classroom> (accessed: October 20, 2022).

19. *Virtual'naya i dopolnennaya real'nost' (VR i AR) chto eto? Vozможnye sfery primeneniya virtual'noy i dopolnennoy real'nosti. Gde primenyayutsya virtual'naya i dopolnennaya real'nost'* [Virtual and augmented reality (VR and AR) — what is it? Possible areas of application of virtual and augmented reality. Where are virtual and augmented reality used?]. Available at: <https://halzen.ru/more/virtualnaya-i-dopolnennaya-realnost-vr-i-ar-chto-eto-vozможnye-sfery.html> (accessed: October 20, 2022).

20. Zaynullina M. R., Morozov Ya. A. Ispol'zovanie virtual'noy, dopolnennoy i smeshannoy real'nosti v obrazovanii [The use of virtual, augmented and mixed reality in education]. *Nauchnye trudy Tsentra perspektivnykh ekonomicheskikh issledovaniy* [Scientific Works of the Center for Advanced Economic Research]. 2020, Iss. 19, pp. 62–67. (In Russian)

21. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskie nakopitel'no-raspredelitel'nye tsentry kak osnova terminal'noy seti regiona: monografiya* [Logistics storage and distribution centers as the basis of the terminal network of the region: monograph]. Novosibirsk, 2012, 184 p. (In Russian)

22. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozok v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure for coal transportation in Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2015, Iss. 1(15), pp. 13–23. (In Russian)

23. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)

24. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaya klassnost' zheleznodorozhnykh stantsiy [Logistic class of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2018, Iss. 2(38), pp. 68–76. (In Russian)

25. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistics transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. (In Russian)

26. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. *Situatsionnoe upravlenie perevozochnym protsessom* [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2004, Iss. 11, p. 14. (In Russian)

27. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Problemy sozdaniya situatsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte [Problems of creating a situational-analytical system for managing the transportation process in railway transport]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2004, Iss. 9, p. 22. (In Russian)

28. Safronova A. A., Rudakova E. N., Kurenkov P. V. et al. *Formirovanie sistemy finansovogo menedzhmenta: teoriya, opyt, problemy, perspektivy: kollektivnaya monografiya* [Formation of the financial management system: theory, experience, problems, prospects: collective monograph]. Moscow, 2018, 228 p. (In Russian)

29. Kurenkov P. V., Vakulenko S. P. Finansovo-ekonomicheskoe reshenie problemy prigorodnykh perevozok [Financial and economic solution to the problem of suburban transportation]. *Ekonomika zheleznnykh dorog* [Economics of Railways]. 2012, Iss. 12, p. 96. (In Russian)

30. Baritko A. L., Kurenkov P. V. Organizatsiya i tekhnologiya vneshnetorgovykh perevozok [Organization and technology of foreign trade transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1998, Iss. 8. (In Russian)
31. Pokrovskaya O. D. “Sbityy pritsel” klientoorientirovannosti [“Shot down sight” of customer orientation]. *RZhD-Partner* [RZD-Partner]. 2016. (In Russian)
32. Pokrovskaya O., Orekhov S., Kapustina N. et al. Formation of logistics facilities in transport corridors. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser.: VIII International Scientific Conference Transport of Siberia — 2020, 2020, p. 012032. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012032.
33. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, Iss. 7, pp. 26–32. (In Russian)
34. Pokrovskaya O. D., Moroz Yu. A. Robotizatsiya i avtomatizatsiya skladskoy i transportnoy logistiki [Robotization and automation of warehouse and transport logistics]. *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Technician of transport: education and practice]. 2022, vol. 3, Iss. 2, pp. 170–175. DOI: 10.46684/2687-1033.2022.2.170-175. (In Russian)
35. Pokrovskaya O. D. Stend dlya issledovaniya dinamiki i prochnosti telezhki gruzovogo vagona [Stand for the study of the dynamics and strength of a freight car bogie]. *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Technician of transport: education and practice]. 2021, vol. 2, Iss. 3, pp. 327–338. DOI: 10.46684/2687-1033.2021.3.327-338. (In Russian)
36. Shmanev T. M., Ul’yanitskaya V. I., Pokrovskaya O. D. “Umnyy vokzal” sistema avtomatizatsii vokzal’nogo kompleksa [“Smart Station” — the automation system of the station complex]. *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Transport Technician: Education and Practice]. 2022, vol. 3, Iss. 3, pp. 305–311. DOI: 10.46684/2687-1033.2022.3.305-311. (In Russian)

Received: January 11, 2023

Accepted: February 13, 2022

#### Author’s information:

Dayana DAVYDOVA — 2nd year Master’s Degree Student, Department of Informational and Computing Systems; dayana-0820@bk.ru

Rinat G. GILVANOV — PhD in Military Sciences, Associate Professor, Department of Informational and Computing Systems; gilvanov1950@mail.ru

Yana V. KUKUSHKINA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Operational Work Management; kukushkina@pgups.ru

Irina Yu. ROMANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Operational Work Management; romira-spb@mail.ru



УДК 53.089.6

## Дистанционная калибровка шаблонов в районах Крайнего Севера

Э. Ю. Чистяков, А. Ю. Павлов, Я. А. Гренадер, А. Г. Нуриев

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

**Для цитирования:** Чистяков Э. Ю., Павлов А. Ю., Гренадер Я. А., Нуриев А. Г. Дистанционная калибровка шаблонов в районах Крайнего Севера // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 133–141. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-133-141

### Аннотация

**Цель:** Рассмотреть возможность проведения дистанционной калибровки электронных путевых шаблонов в районах Крайнего Севера. Поверка и калибровка средств измерений являются важнейшими метрологическими операциями, направленными на обеспечение единства измерений и позволяющими определить значения измеряемой величины по показаниям средства измерений, определить поправки к его показаниям и оценить погрешность этих средств. С развитием общества и технологий актуальным стал курс на совершенствование процедур калибровки средств измерений и автоматизацию процессов. Активное внедрение программируемых средств измерений открыло возможности для внедрения новых способов передачи единиц физических величин. Показать преимущество дистанционной калибровки электронных путевых шаблонов по сравнению с обычной калибровкой в экономическом и временном аспектах, так как исчезает необходимость транспортировать путевой шаблон в отдаленные центры метрологии для проведения периодической калибровки. **Методы:** Проведение эксперимента дистанционной калибровки электронного путевого шаблона на большом расстоянии с использованием глобальной сети Интернет и специального программного обеспечения, а именно программ «Модуль интеграции», «Сервисное ПО Нева-1», LetsView, Unitess View, «Агент Мейл.ру». **Результаты:** Определена возможность проведения дистанционной калибровки, опробованы необходимые для работы программы, представлены результаты экспериментального исследования с использованием глобальной сети Интернет, и получен протокол калибровки. **Практическая значимость:** Определена возможность внедрения дистанционной калибровки, которая позволит снизить затраты на транспортировку электронных путевых шаблонов для их периодической калибровки и уменьшить затрачиваемое время на метрологическое обслуживание.

**Ключевые слова:** Дистанционная калибровка, электронный путевой шаблон, измерение, информационные технологии, Крайний Север.

### Введение

В современном мире активно развиваются технологии, автоматизируются процессы и решаются вопросы по ресурсосбережению. Новым направлением в автоматизации процессов, выполняемых с целью метрологического обслуживания средств измерений (далее — СИ), является дис-

танционная калибровка. Отношения, возникающие при выполнении измерений, регулирует Федеральный закон № 102-ФЗ [1]. Отметим, что калибровке в системе калибровки ОАО «Российские железные дороги» (далее — СКРЖД) подвергаются СИ, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования

обеспечения единства измерений. Требования, предъявляемые к калибровке, отражены в СТО РЖД 06.001—2014 [2], СТО РЖД 06.002—2014 [3] и СТО РЖД 06.003—2014 [4].

В данной статье описывается метод контроля метрологических характеристик (далее — МХ) электронных путевых шаблонов в отдаленных районах Крайнего Севера. Предполагается, что использование дистанционной калибровки шаблонов в метрологических службах линейных предприятий ОАО «Российские железные дороги» (далее — ОАО «РЖД») приведет к положительному экономическому и временному эффекту.

В 2020 году ОАО «РЖД» начали активно внедрять электронные путевые шаблоны для контроля параметров железнодорожного пути. Октябрьский центр метрологии — филиал ОАО «РЖД» (далее — ОЦМ), выполняющий функцию метрологического контроля СИ, начал производить калибровку данных шаблонов. Совместно с ОЦМ и кафедрой «Строительные материалы и технологии» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (далее — кафедра) был осуществлен ряд экспериментов по проведению дистанционной калибровки с использованием шаблона путевого электронного «НЕВА — 1С» (далее — шаблон) [5].

### Описание электронного путевого шаблона «НЕВА — 1С»

Шаблоны предназначены для измерения геометрических параметров железнодорожных и трамвайных путей шириной колеи 1520 мм: ширина колеи, относительного возвышения рельсов (уровня), ординат переводных кривых, расстояний «сердечник крестовины — контррельс», расстояния «контррельс — усовик», ширины желобов, размера бокового износа головки рельса, вертикального отклонения элементов рельсовой колеи относительно поверхности катания.

Шаблон (рис. 1) изготовлен на базе алюминиевого конструкционного профиля, состоит из подвижного и неподвижного упоров, рукоятки с рычагом, концевого датчика (в зависимости от модификации). На профиль устанавливается измерительный узел, содержащий измерительные датчики, кнопки управления и индикатор, каретка измерительная.

### Калибровка электронного путевого шаблона «НЕВА — 1С»

Калибровка — это совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик СИ [1]. Калибровка проводится метрологической службой или физическим лицом при наличии надлежащих условий для квалифицированного выполнения этой работы.

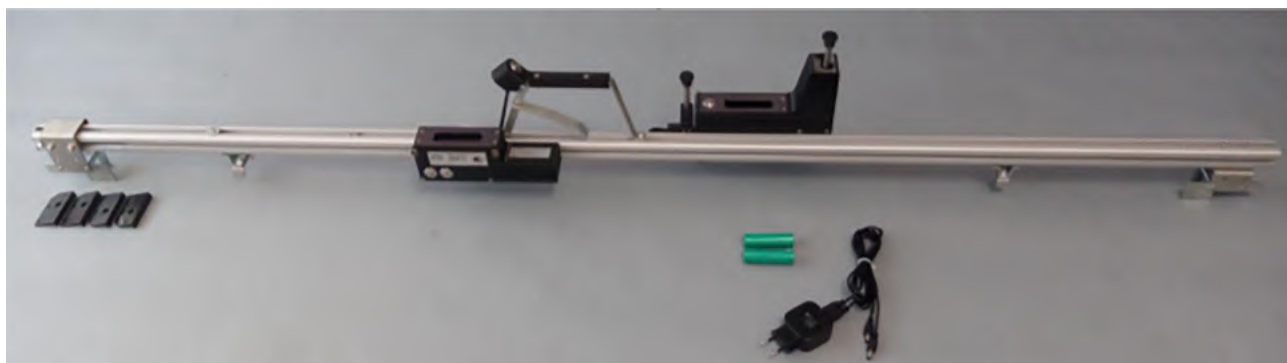


Рис. 1. Электронный путевой шаблон «НЕВА — 1С»



Рис. 2. Камера и установка для проведения дистанционной калибровки

Калибровка шаблона осуществляется по методике ВДМА.663500.186 МК «Шаблоны электронные путевые» [6].

Основные средства, необходимые для проведения калибровки:

- стенд для контроля путевых шаблонов модели 31000;
- термогигрометр;
- мегаомметр.

Допускается применение аналогичных средств калибровки, обеспечивающих определение метрологических характеристик калибруемых средств измерений с требуемой точностью.

Для проведения калибровки в ОЦМ согласно регламенту необходимо:

- 1) предоставить шаблон на калибровку в ОЦМ;
- 2) произвести калибровку шаблона в установленный срок;
- 3) выдать откалиброванный шаблон.

Такой способ калибровки является высокотратным как в финансовом, так и временном аспекте. Для решения этой проблемы мы совместно с кафедрой и ОЦМ реализовали дистанционный способ калибровки шаблонов, собрав установку для ее проведения и оценив эффективность данного способа.

### **Описание установки для проведения дистанционной калибровки электронного путевого шаблона «НЕВА — 1С»**

Собранная установка представлена на рис. 2. Для проведения дистанционной калибровки необхо-

димо учесть условия окружающей среды [7, 8]. Оценка условий окружающей среды может осуществляться с помощью термогигрометров с цифровым выходом и возможностью подключения к ПК.

Установка состоит из комплекса устройств, таких как:

- персональный компьютер (далее — ПК);
- стенд для контроля путевых шаблонов модели 31000;
- шаблон;
- смартфон с операционной системой Android;
- 2 камеры, изображения которых выводятся на ПК. Одна камера направлена на оператора шаблона, а вторая — на стенд (рис. 3);
- термогигрометр;
- мегаомметр.

### **Программное обеспечение для проведения дистанционной калибровки путевого шаблона «НЕВА — 1С»**

Для проведения дистанционной калибровки шаблона необходимо специальное программное обеспечение, которое состоит из таких программ, как:

- LetsView — программа для трансляции экрана смартфона на удаленный персональный компьютер или любое другое устройство (рис. 4);
- Unitess View — программа для дублирования показаний термогигрометра, подключенного к персональному компьютеру (рис. 5);



Рис. 3. Изображения с двух камер

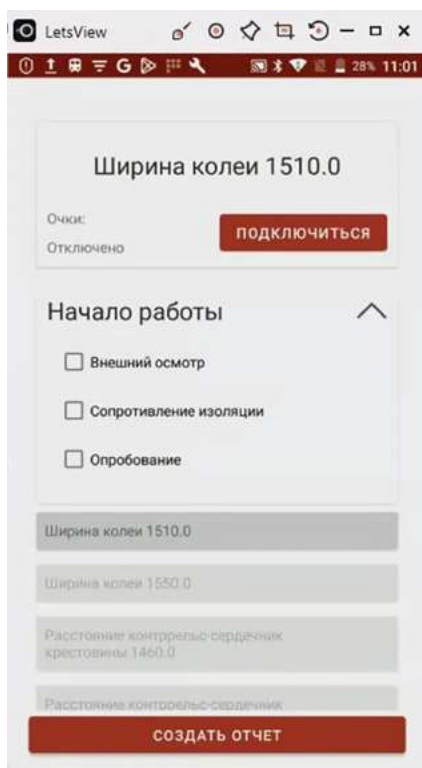


Рис. 4. Пример работы программы сервисное ПО Нева-1 через трансляцию экрана смартфона с помощью программы LetsView

| Транспорт |       |        |        |
|-----------|-------|--------|--------|
| B2        | Имя   | t, °C  | RH, %  |
|           |       | P, kPa |        |
| 170251    | 23.07 | 61.90  | 101.02 |

Рис. 5. Пример работы программы Unitess View

- «Агент Мейл.ру» — программа для коммуникации оператора и калибровщика;
- Bandicam — программа для записи экрана во время калибровки для составления видеопотока.

Электронный путевой шаблон является программируемым средством измерения, который имеет возможность связываться через Bluetooth с другими устройствами. Интернет выступает как средство передачи данных [9].

Шаблон совместно со смартфоном обеспечивает прием данных от электронного блока шаблона, их первичную обработку и хранение, визуализацию, первичное заполнение установленных форм документов.

На телефон необходимо установить специализированное программное обеспечение для подключения к путевому шаблону:

- модуль интеграции — необходим для корректной работы сервисного ПО Нева-1;
- сервисное ПО Нева-1, которое подключается к шаблону для проведения калибровочных работ (трансляция экрана смартфона проводится через Letsview), (рис. 4).

Сервисное ПО Нева-1 выполняет следующие функции:

- получение данных от шаблона;
- формирование отчетов по заданной форме;
- отображение данных.

### Дистанционная калибровка путевого шаблона «Нева — 1С»

После сбора установки и загрузки всего необходимого программного обеспечения можно приступить к дистанционной калибровке.

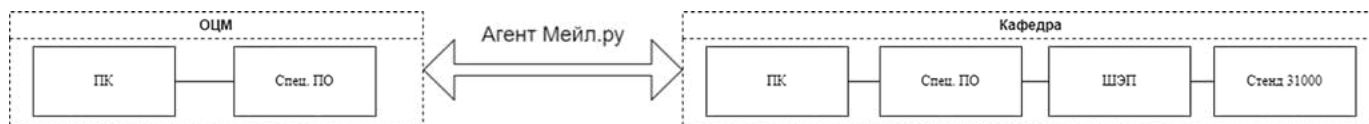


Рис. 6. Схема коммуникации при дистанционной калибровке

Для проведения дистанционной калибровки обучающийся кафедры (далее — оператор) связывается с калибровщиком ОЦМ, который установил программы, описанные в разделе «Программное обеспечение для проведения дистанционной калибровки путевого шаблона “НЕВА — 1С”».

Коммуникация между калибровщиком и оператором приведена на схеме — рис. 6.

Эта схема наглядно показывает, как через программу «Агент Мейл.ру», связываются калибровщик и оператор, чтобы провести дистанционную калибровку шаблона [10].

При выполнении дистанционной калибровки оператору сообщают последовательность действий согласно методике калибровки шаблона и контролируют правильность ее выполнения.

По завершению проведения оператором калибровки программа сервисное ПО Нева-1 формирует протокол результатов измерений. Кроме

электронного протокола ведется видеофиксация процесса калибровки.

Последовательность действий для выполнения дистанционной калибровки электронного путевого шаблона:

1. Калибровщик центра метрологии созванивается по видеосвязи с оператором, который готовится к проведению калибровки.

2. Калибровщик посредством специального программного обеспечения ведет запись экрана для составления видеопотокола калибровки.

3. Оператор демонстрирует свой экран калибровщику через программу для коммуникации «Агент Мейл.ру», на котором транслируется действия оператора через две установленные камеры. Также на экране отображаются: температура, влажность, давление и экран смартфона, подключенный к шаблону для его калибровки (рис. 7).

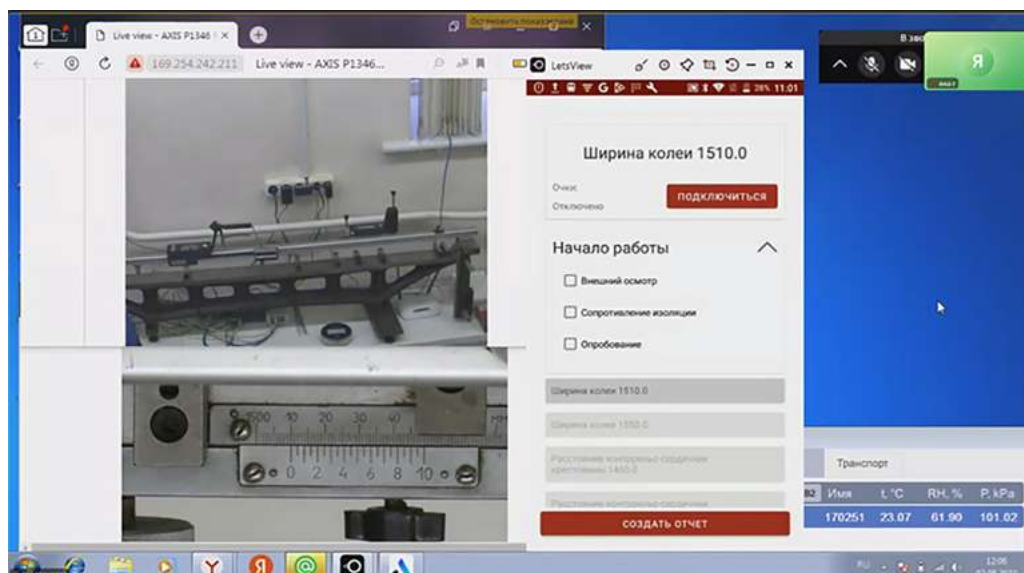


Рис. 7. Экран компьютера со всеми программами, который дублируется от оператора калибровщику через программу для коммуникации «Агент Мейл.ру»



4. Калибровщик, согласно установленной методике, задает необходимые параметры оператору, которые следует выполнить для калибровки шаблона.

5. После правильного выполнения всех пунктов оператор отправляет готовый отчет со всеми результатами калибровки на электронную почту калибровщика (рис. 8).

Дистанционная калибровка на этом завершается. Оператор выполнил калибровку и получил протокол о калибровке шаблона, а калибровщик в виде доказательств выполнения калибровки имеет как электронный протокол с определенными значениями МХ шаблона, так и видеопротокол с выполнением дистанционной калибровки.

В ходе научно-исследовательской работы студентами кафедры совместно с ОЦМ была выполнена дистанционная калибровка шаблона. С помощью специализированного программного обеспечения автоматически был получен протокол калибровки СИ, запись экрана компьютера в ходе проведения дистанционной калибровки представляет собой видеопротокол выполняемых оператором действий. Определено, что необходимо предъявлять высокие требования к качеству связи и скорости передачи информации, чтобы осуществлять надлежащий визуальный контроль за действиями оператора.

Вопрос защиты информации от искажения результатов решается с помощью программного обеспечения на смартфоне оператора. Если в ходе выполнения калибровки значения, которые получает оператор, выходят за пределы допускаемых отклонений, то доступ к измерениям остальных МХ блокируется. В таком случае протокол калибровки формируется только по измеренным параметрам.

## Заключение

Реализация дистанционной калибровки электронных путевых шаблонов является ответом на

решение проблем, связанных с трудной логистикой транспортировки шаблонов из отдаленных точек Крайнего Севера. На Северной железной дороге самым длинным маршрутом, расстоянием в 3000 километров, является путь из Елецкого поселка в город Сосногорск, откуда транспортируют электронные путевые шаблоны для калибровки в метрологическую лабораторию Сосногорска. Для того чтобы откалибровать шаблоны, необходимо иметь подменный фонд на то время, пока шаблон отправляется на калибровку, каждый шаблон стоит примерно 250 000 рублей, также необходимо оплачивать командировочные работнику, который везет шаблоны для метрологического обслуживания, выделять автомобиль, оплачивать услуги водителя и топливо, работникам при транспортировке приходится делать 4 поездки: привезти шаблон в центр метрологии, уехать обратно и дожидаться извещения о проведении калибровки, приехать снова в центр, забрать откалиброванные шаблоны и вернуться с ними на свое рабочее место. Таким образом, дистанционная калибровка сокращает временные затраты и вытекающие из всего вышеперечисленного финансовые затраты. Внедрение и использование данного метода калибровки шаблонов зависит от признания результатов данной метрологической услуги.

Недостатком дистанционной калибровки является необходимость транспортировать забракованные шаблоны в центр метрологии для их ремонта, а также есть возможность внесения изменений оператором в протокол измерений.

*Статья опубликована при поддержке федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Октябрьский центр метрологии - структурное подразделение<br>Октябрьской железной дороги - филиала ОАО "РЖД"                                                                                                                                                                                                                         |                                             |
| 169240. Санкт-Петербург, участок ж.д. Литовский канал - Пулковское шоссе, лит.А, пом. 1Н, 2-Н                                                                                                                                                                                                                                       |                                             |
| Регистрационный номер в реестре аккредитованных лиц RARU 310555                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
| Протокол калибровки № от 02.08.22                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                             |
| 1. Общие сведения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                             |
| Вид поверки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Периодическая                               |
| Наименование заказчика                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                             |
| Основание для проведения поверки<br>(номер заказ-наряда, АПД, договора и т.п.)                                                                                                                                                                                                                                                      |                                             |
| Наименование СИ, тип                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Шаблоны путевые электронные "НЕВА-1С"       |
| Заводской серийный номер СИ                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | NEVA-0158                                   |
| Метрологические характеристики (диапазон, класс точности, погрешность и т.п.)                                                                                                                                                                                                                                                       | Диапазон (0-1560)мм<br>ПГ± 1 мм             |
| 2. Методика поверки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                             |
| Шаблоны путевые электронные "НЕВА-1С" Методика калибровки МЛАС.401739.377 МК                                                                                                                                                                                                                                                        |                                             |
| 3. Применяемые эталоны                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                             |
| Стенд для контроля путевых шаблонов модели 31000 ТУ 3938-022-59489947-2007 с погрешностью воспроизведения значения ширины колеи, ординат переводных кривых, ширины желобов, расстояния между рабочими гранями сердечника или усовика и контррельса не более ±0,1 мм, возвышения одного рельса относительно другого не более ±0,2 мм |                                             |
| Меры длины концевые плоскопараллельные набор Н2 КТ-2 ГОСТ 9038-90                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                             |
| 4. Применяемые вспомогательное оборудование и СИ                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                             |
| Мегаомметр с верхним пределом измерений 500 МОм и номинальным напряжением 500В<br>ГОСТ 23706-93                                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
| 5. Условия проведения поверки                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                             |
| Нормируемые параметры                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Допускаемые значения<br>В начале<br>В конце |
| Температура окружающего воздуха, °С                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 20±5                                        |
| Относительная влажность, %                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 30-80%                                      |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                         |                            |                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Результаты калибровки                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                         |                            |                                    |
| Внешний осмотр                                                                                                                                                                                                                                                                    | соответствует п.5.1.5 методики калибровки               |                            |                                    |
| Проверка сопротивления изоляции                                                                                                                                                                                                                                                   | не менее 50 МОм соответствует п.5.2 методики калибровки |                            |                                    |
| Опробование                                                                                                                                                                                                                                                                       | соответствует п.5.3 методики калибровки                 |                            |                                    |
| Проверка соответствия ПО                                                                                                                                                                                                                                                          | нет возможности провести данную операцию.               |                            |                                    |
| Определение метрологических характеристик:                                                                                                                                                                                                                                        |                                                         |                            |                                    |
| Измеряемый параметр                                                                                                                                                                                                                                                               | показания шаблона, мм                                   | погрешность шаблона, мм(*) | предел допускаемой погрешности, мм |
| Ширина колеи                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1510,6                                                  | 0,6                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1550,9                                                  | 0,9                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1460,4                                                  | 0,4                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1500,3                                                  | 0,3                        | 1                                  |
| Расстояние между рабочими гранями сердечника и контррельса                                                                                                                                                                                                                        | 1420,7                                                  | 0,7                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1460,5                                                  | 0,5                        | 1                                  |
| Ширина желобов                                                                                                                                                                                                                                                                    | 39,8                                                    | 0,2                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 55,2                                                    | 0,2                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 400,1                                                   | 0,1                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 324,6                                                   | 0,6                        | 1                                  |
| Ординаты переводных кривых                                                                                                                                                                                                                                                        | 650,6                                                   | 0,6                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1480,8                                                  | 0,8                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0                                                       | 0                          | 1                                  |
| Вертикальные отклонение элементов стрелочных переводов                                                                                                                                                                                                                            | -20,2                                                   | 0,2                        | 1                                  |
| Измерение бокового инкеса головки рельса, рамного рельса и остряка                                                                                                                                                                                                                | 27,8                                                    | 0,3                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -0,9                                                    | 0,9                        | 1                                  |
| Возвышение одного рельса относительно другого (левого относительно правого)                                                                                                                                                                                                       | -60,4                                                   | 0,4                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -80,4                                                   | 0,4                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -119,9                                                  | 0,1                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -160,4                                                  | 0,4                        | 1                                  |
| Возвышение одного рельса относительно другого (правого относительно левого)                                                                                                                                                                                                       | 1                                                       | 1                          | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 60                                                      | 0                          | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 80,1                                                    | 0,1                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 119,9                                                   | 0,1                        | 1                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 160,1                                                   | 0,1                        | 1                                  |
| *-величина погрешности указана по модулю                                                                                                                                                                                                                                          |                                                         |                            |                                    |
| На основании результатов периодической калибровки установлено, что технические и метрологические характеристики соответствуют требованиям изготовителя (МЛАС.401739.377 РЭ-1У). Установить соответствие ПО требованиям изготовителя не представляется возможным, отсутствует МРМ. |                                                         |                            |                                    |
| Место для знака калибровки                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                         |                            |                                    |
| Начальник отдела линейно-угловых измерений                                                                                                                                                                                                                                        | подпись                                                 |                            | А.Ю.Павлов<br>Инициалы, фамилия    |
| Калибровщик                                                                                                                                                                                                                                                                       | подпись                                                 |                            | А.Ю.Павлов<br>Инициалы, фамилия    |
| Дата выдачи сертификата калибровки г.                                                                                                                                                                                                                                             |                                                         |                            |                                    |

Рис. 8. Протокол калибровки

## Библиографический список

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» // Российская газета. — 2008. — № 140.
2. СТО РЖД 06.001—2014. Система калибровки средств измерений в ОАО «РЖД». Основные положения. — 2014. — 22 с.
3. СТО РЖД 06.002—2014. Система калибровки средств измерений в открытом акционерном обществе «Российские железные дороги». Порядок аккредитации на компетентность в области калибровки средств измерений и предоставления права выполнения калибровочных работ в системе калибровки средств измерений в ОАО «РЖД». — 2014. — 46 с.
4. СТО РЖД 06.003—2014. Система калибровки средств измерений в открытом акционерном обществе «Российские железные дороги». Калибровочные клейма. — 2014. — 20 с.
5. Кулешов А. В. Описание типа средства измерений / А. В. Кулешов // Шаблоны путевые электронные. — URL: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/74678-19.pdf> (дата обращения: 10.11.2022).
6. ВДМА.663500.186 МК. Шаблоны электронные путевые. Методика калибровки. — Санкт-Петербург, 2020. — 16 с.
7. Шаблоны путевые электронные «НЕВА-1». Методика калибровки. — Санкт-Петербург, 2020. — 19 с.
8. ПР 50.2.016—94 ГСИ. Требования к выполнению калибровочных работ // Российские вести. — 1995. — № 78.
9. Производители, поставщики и поверители // Шаблоны электронные путевые ШЭП. — URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/75892-19-shep> (дата обращения: 10.11.2022).
10. Толочко Т. К. Дистанционная калибровка средств измерений / Т. К. Толочко, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. — 2008. — № 1(31). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/distantcionnaya-kalibrovka-sredstv-izmereniy> (дата обращения: 10.11.2022).

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 13.02.2023

### Контактная информация:

НУРИЕВ Али Гасаналиевич — студент;

[informatiks20@gmail.com](mailto:informatiks20@gmail.com)

ГРЕНАДЕР Яна Алексеевна — студент;

[yana.grenader@yandex.ru](mailto:yana.grenader@yandex.ru)

ЧИСТЯКОВ Эдуард Юрьевич — ст. преподаватель;

[chistyakov@pgups.ru](mailto:chistyakov@pgups.ru)

ПАВЛОВ Алексей Юрьевич — ст. преподаватель;

[zedasmo3@gmail.com](mailto:zedasmo3@gmail.com)

## Remote Calibration of Templates in the Far North districts

**E. Yu. Chistyakov, A. Yu. Pavlov, Ya. A. Grenader, A. G. Nuriev**

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

**For citation:** Chistyakov E. Yu., Pavlov A. Yu., Grenadier Ya. A., Nuriev A. G. Remote Calibration of Templates in the Far North districts // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 133–141. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-133-141

### Summary

**Purpose:** To consider the possibility of remote calibration of electronic travel templates in the Far North districts. Verification and calibration of measuring instruments are the most important metrological operations aimed at the support of measurement uniformity and allowing to determine being measured quantity values with the indications of a measuring instrument, to define corrections to its indications and to estimate the inaccuracy of these instruments. With society and technology development, the course on the improvement of calibration procedures of measuring instruments and automation of processes has become relevant. Active introduction of programmable measuring instruments has opened up opportunities for the introduction of new ways of



transmitting the units of physical quantities. To show the advantage of remote calibration of electronic trip templates in comparison with conventional calibration in economic and time terms since the need to transport a trip template to distant metrology centers for periodic calibration check disappears. **Methods:** Conducting experiment of remote calibration of electronic trip template at a big distance using Internet global network and special software, namely the programs “Integration Module”, “Neva-1 Service Software” “LetsView”, “Unitess View”, “Agent Mail.ru”. **Results:** The possibility of remote calibration was determined, the programs necessary for the work were tested, the results of experimental study with the use of Internet global network were presented and calibration protocol was obtained. **Practical significance:** The possibility of introducing remote calibration has been determined which will allow to reduce cost for transportation of electronic trip templates upon their periodic calibration and to lower the required time for metrological maintenance.

**Keywords:** Remote calibration, electronic trip template, measurement, informational technologies, Far North.

## References

1. Federal'nyy zakon ot 26 iyunya 2008 g. № 102-FZ “Ob obespechenii edinstva izmereniy” [Federal Law of June 26, 2008 № 102-FZ “On Ensuring the Uniformity of Measurements”]. *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper]. 2008, Iss. 140. (In Russian)
2. *STO RZhd 06.001—2014. Sistema kalibrovki sredstv izmereniy v OAO “RZhd”. Osnovnye polozheniya* [STO RZD 06.001—2014. Calibration system of measuring instruments in JSC “RZD”. Basic provisions]. 2014, 22 p. (In Russian)
3. *STO RZhd 06.002—2014. Sistema kalibrovki sredstv izmereniy v otkrytom aktsionernom obshchestve “Rossiyskie zheleznye dorogi”. Poryadok akkreditatsii na kompetentnost' v oblasti kalibrovki sredstv izmereniy i predostavleniya prava vypolneniya kalibrovочnykh rabot v sisteme kalibrovki sredstv izmereniy v OAO “RZhd”* [STO RZD 06.002—2014. Calibration system of measuring instruments in the open Joint Stock Company “Russian Railways”. The procedure for accreditation for competence in the field of calibration of measuring instruments and granting the right to perform calibration work in the calibration system of measuring instruments in JSC “Russian Railways”]. 2014, 46 p. (In Russian)
4. *STO RZhd 06.003—2014. Sistema kalibrovki sredstv izmereniy v otkrytom aktsionernom obshchestve “Rossiyskie zheleznye dorogi”. Kalibrovочnye kleyma* [STO RZD 06.003—2014. Calibration system of measuring instruments in the open Joint Stock Company “Russian Railways”. Calibration stamps]. 2014, 20 p. (In Russian)
5. Kuleshov A. V. Opisanie tipa sredstva izmereniy [Description of the type of measuring instrument]. *Shablony putevye elektronnye* [Travel electronic templates]. Available at: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/74678-19.pdf> (accessed: November 10, 2022). (In Russian)
6. *VDMA.663500.186 MK. Shablony elektronnye putevye. Metodika kalibrovki* [VDMA.663500.186 MK. Electronic travel templates. Calibration procedure]. St. Petersburg, 2020, 16 p. (In Russian)
7. *Shablony putevye elektronnye “NEVA-1”. Metodika kalibrovki* [Electronic travel templates “NEVA-1”. Calibration procedure]. St. Petersburg, 2020, 19 p. (In Russian)
8. PR 50.2.016—94 GSI. Trebovaniya k vypolneniyu kalibrovочnykh rabot [Requirements for performing calibration work]. *Rossiyskie vesti* [Russian News]. 1995, Iss. 78. (In Russian)
9. Proizvoditeli, postavshchiki i poveriteli [Manufacturers, suppliers and verifiers]. *Shablony elektronnye putevye ShEP* [Templates electronic travel SHEP]. Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/75892-19-shep> (accessed: November 10, 2022). (In Russian)
10. Tolochko T. K., Gusinskiy A. V., Kostrikin A. M. Distantionnaya kalibrovka sredstv izmereniy [Remote calibration of measuring instruments]. *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIR]. 2008, Iss. 1(31). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/distantionnaya-kalibrovka-sredstv-izmereniy> (accessed: November 10, 2022). (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 13, 2023

## Author's information:

Ali G. NURIEV — Student;  
informatiks20@gmail.com

Yana A. GRENADER — Student;  
yana.grenader@yandex.ru

Eduard Yu. CHISTYAKOV — Senior Lecturer;  
chistyakov@pgups.ru

Alexey Yu. PAVLOV — Senior Lecturer;  
zedasmo3@gmail.com

УДК 504.06

## Экологически безопасные направления использования отходов добычи угля как техногенного сырья алюминия

Е. И. Верех–Белоусова<sup>1</sup>, А. В. Харламова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля, ЛНР, Российская Федерация, 91034, Луганск, кв. Молодежный, 20а

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

**Для цитирования:** Верех-Белоусова Е. И., Харламова А. В. Экологически безопасные направления использования отходов добычи угля как техногенного сырья алюминия // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 142–150. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-142-150

### Аннотация

**Цель:** Обоснование и разработка новых экологически безопасных направлений утилизации отвальной породы угольных шахт Донбасса в качестве техногенных месторождений алюминия. Исследовать минералогический и химический состав образцов отвальной породы разной степени метаморфизма с целью обоснования возможности их переработки как техногенного бедного алюминиевого сырья. Провести эксперименты по химическому и биохимическому (бактериальному) выщелачиванию подвижных (растворимых) соединений алюминия из образцов отвальной породы. **Методы:** Анализ химических превращений и техногенной минералогии в складированной отвальной породе. Проведено химическое и биохимическое кислотное выщелачивание сульфатных солей алюминия из отвальной породы разной степени метаморфизма. **Результаты:** Установлено, что по содержанию бокситов отвальную породу угольных шахт Донбасса можно отнести к бедному алюминиевому сырью. Предложен способ кислотного химического выщелачивания растворимых соединений алюминия растворами серной кислоты различных концентраций, и доказано эффективное выщелачивание слабыми растворами кислоты. Обоснован и доказан способ биохимического (бактериального) выщелачивания солей алюминия. **Практическая значимость:** Доказано, что экологичность и экономичность процесса кучного биохимического выщелачивания обеспечивается тем, что основной реагент — серная кислота — образуется естественным путем в результате жизнедеятельности бактерий и процесс не нуждается в дополнительных технологических единицах для производства кислоты.

**Ключевые слова:** Шахты, породные отвалы, переработка отходов, кислотное выщелачивание, бактерии *Th. ferrooxidans*, алюминий.

### Введение

Результатом добычи и переработки угля в Донбассе является накопление большого количества крупнотоннажных отходов — породных отвалов и терриконов. Такие породные отвалы, занимая большие территории, негативно влияют на состояние окружающей среды, подвергаются процессам горения, водной и ветровой эрозиям. В результате естественных физико-химических

процессов, протекающих в толще складированной породы, прилегающие к отвалам территории подвергаются загрязнению тяжелыми металлами, оксидами серы и углерода, сероводородом, а также радионуклидами и органическими летучими соединениями. Большинство подобных отходов расположены в селитебных зонах и зачастую без соблюдения санитарно-защитной зоны, что оказывает прямое негативное воздействие на

состояние здоровья населения, проживающего в зоне влияния.

Все эти и другие факторы требуют решения проблемы накопления отходов добычи и переработки угля в регионе. В сложившихся экологических условиях и требованиях экономики к значительному росту эффективности использования ресурсного потенциала утилизация подобного рода отходов должна быть обоснована как с экологической, так и с экономической точки зрения. Данной проблеме уже более трех десятилетий посвящается значительное количество научных работ отечественных и зарубежных ученых (М. Я. Шпирт, Б. С. Панов, Л. Г. Зубова, В. Б. Артемьев, А. К. М. Rainbow, D. Leinenger, E. Raask, I. Twardowska и др.). Однако проблема до сегодняшнего дня остается нерешенной в силу невозможности предложения эколого-экономически оправданных направлений комплексной или малоотходной утилизации.

Основной **целью** работы является обоснование и разработка новых экологически безопасных направлений использования отвальной породы угольных шахт Донбасса в качестве техногенных месторождений алюминия.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование минералогического и химического состава образцов отвальной породы разной степени метаморфизма с целью обоснования возможности их переработки как техногенного бедного алюминиевого сырья.

2. Проведение экспериментов по химическому и биохимическому (бактериальному) выщелачиванию подвижных (растворимых) соединений алюминия из образцов отвальной породы.

## Материалы и методы исследования

Отвальная порода угольных шахт содержит в своем составе практически все элементы периодической системы Д. И. Менделеева, что и

обуславливает ее «богатый» минералогический состав. Однако основными по массе минералами являются алюмосиликаты и сульфидные соединения железа — пирит и марказит. В золе отвальной породы, согласно нашим исследованиям и данным донецких ученых [1], также преобладают оксиды кремния, алюминия и железа.

Причины негативного влияния отвалов угольных шахт на окружающую среду обусловлены процессами химического и биохимического окисления сульфидов (пирита и марказита) в складированной породе. Породы отвалов имеют своеобразные водно-физические свойства: скелет и каменистость обуславливают их высокую водопроницаемость, а наличие мелкоземлистого элювия глинистых пород и щебнисто-каменистых фракций аргиллита с влагоемкостью около 8–10 % определяют достаточно большой запас влаги. В результате этого создается стабильный водный режим, сохраняя значительные запасы производительной влаги [1–4]. Кроме того, угли и углистые породы при добыче оказываются дополнительно переувлажненными, так как при выемочных работах поступает большое количество подземных вод в призабойные и выработанные пространства из водоносных горизонтов. Поднятие увлажненной породы на поверхность и отсыпка в отвалы приводит к дополнительному переувлажнению ее атмосферными осадками. Такое постоянное проникновение влаги в поровые растворы отвальной породы изменяет состав и свойства последних, а затем изменяет и химический состав минералов, находившихся ранее в шахтной выработке в относительно стабильных восстановительных условиях и тем самым вызывает новые геохимические изменения. При этом имеют место процессы растворения, выщелачивания, гидратации и др. Этим геохимическим процессам особенно подвержены минералы, содержащие элементы с несколькими степенями окисления и валентности: сера, железо, алюминий, марганец и другие.

Гипергенные геохимические превращения в отвальной породе связаны с процессом взаимодействия серы, пирита и марказита, входящих в состав породы с влагой и кислородом окружающей среды, в результате чего образуется серная кислота. А при наличии в поровых растворах породы тионовых бактерий *Th. ferrooxidans* процесс кислотообразования приобретает биохимическую природу. Такие реакции являются экзотермическими, что приводит к дальнейшим геохимическим превращениям при повышении температуры в толще породы.

Все эти факторы приводят к изменению минералогического состава поднятой на поверхность породы, возникают новые минералы, и такая минералогия уже имеет техногенное происхождение.

Донецкими и луганскими учеными [1, 5] установлено, что при длительном самонагревании в складированной отвальной породе образуются сернокислотные зоны, серная кислота взаимодействует с минералами и ускоряет при повышенных температурах гидролиз полевых шпатов, а также взаимодействует с элементной серой, разлагая минералы породы, переводя их компоненты в виде сульфатов в раствор. Вследствие этого породы обогащаются кремнеземом, глиноземами, полевыми шпатами. Гидролиз этих минералов при повышенных температурах сопровождается образованием каолина. При дальнейшем самонагревании до 600 °С и более протекают процессы превращения каолина в метакаолин  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и затем в  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ .

По данным Ю. А. Проскурни [6] и М. Я. Шпирга [7] в результате изучения терриконов угольных шахт были обнаружены такие техногенные алюминийсодержащие минералы: галотрихит —  $\text{FeAl}_2[\text{SO}_4]_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ , пикерингит —  $\text{MgAl}_2[\text{SO}_4]_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ , тамаругит —  $\text{NaAl}[\text{SO}_4]_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , алуноген —  $\text{Al}_2[\text{SO}_4]_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ , чермигит —  $\text{NH}_4\text{Al}[\text{SO}_4]_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , мулит —  $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ , даусонит  $\text{NaAl}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ , диккит и другие. Условия их обра-

зования разнообразны. Часть минералов формируется в результате псевдофумарольной деятельности при сублимации газообразных продуктов из очагов горения (температура образования минералов — 80–300 °С). Однако гипергенные изменения пород в поверхностных слоях отвалов обуславливаются влиянием  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Температура образования минералов этой группы — 10–80 °С. На поверхности выделяются алюмосульфатные корки (с преобладанием сульфатов  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ ), которые формируются при резком доминировании глинистых пород [2, 3, 6].

Для проведения исследований были отобраны образцы отвальной породы разной стадии метаморфизации: свежееотсыпанная отвальная порода средней метаморфизации ш/у «Луганская» (г. Луганск); отвальная порода сильной метаморфизации в процессе самонагревания шахт им. Г. Вахрушева (г. Антрацит) и им. М. Свердлова (г. Свердловск); перегоревшая отвальная порода слабой метаморфизации шахты «Матросская» (г. Лисичанск).

Химический анализ отвальной породы на содержание отдельных элементов осуществляли с применением метода атомно-эмиссионной спектроскопии. Валовое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в золе образцов породы определялось весовым методом и с использованием объединенного реагента (алюминон). Обменный (подвижный) алюминий в отвальной породе выделяли раствором хлористого калия с дальнейшим получением окрашенного комплекса алюминия с хромазуролом С или ксилиновым оранжевым в слабокислой среде с последующим фотометрированием полученного окрашенного раствора. Выделение чистой культуры бактерий *Th. ferrooxidans* проводилось согласно общепринятым микробиологическим методикам.

## Результаты исследования и их обсуждение

Учитывая протекающие в складированной отвальной породе химические и биохимические

процессы окисления сульфидов, техногенного минералообразования и выщелачивания металлов, использование отходов добычи и переработки угля в качестве техногенного алюминиевого сырья является оправданным, так как в породе имеются все необходимые для биохимического выщелачивания компоненты: каолиниты, сульфиды (пирит, марказит), тионовые бактерии *Th. ferrooxidans*; а вследствие горения терриконов (или искусственного обжига породы) алюминий легче переходит в свободную ионную форму.

Спектральный анализ отобранных образцов породы показал, что в ее химическом составе преобладают кремний, железо, алюминий, медь, титан, хром, марганец, никель, цинк, галлий, германий, висмут, цирконий, иттрий и др. Причем содержание некоторых легких (алюминий, титан) и редкоземельных металлов (галлий, германий, цирконий и др.) приближено к минимальной промышленной концентрации.

Проведены исследования на содержание алюминия (в виде оксида  $Al_2O_3$ ) в образцах горелой и негорелой отвальной породы, и в результате установлено, что содержание  $Al_2O_3$  колеблется от 13 до 21%, поэтому отвальную породу можно отнести к бедному алюминиевому сырью (табл. 1). Превышение содержания  $Al_2O_3$  в образцах перегоревшей породы объясняется тем, что горелые породы (горелый тонштейн) терриконов, по отношению к свежедобытым, характеризуются большим содержанием  $Al_2O_3$ .

Угли и подстилающие их горные породы содержат большое количество влаги в порах. Однако антрациты, а также все угли сильной и средней степени метаморфизации по сравнению с другими каменными углями содержат больше поровой влаги. Поэтому дальнейшим этапом исследования было определение подвижных форм алюминия (водорастворимых сульфатных солей) в образцах горелой и негорелой породы разной степени метаморфизма (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. Содержание  $Al_2O_3$  в образцах отвальной породы

| Отвальная порода                 | Содержание $Al_2O_3$ , % |
|----------------------------------|--------------------------|
| В стадии горения (г. Свердловск) | 20,87                    |
| Перегоревшая (г. Антрацит)       | 19,80                    |
| Свежеотсыпанная (г. Луганск)     | 13,79                    |
| Перегоревшая (г. Лисичанск)      | 18,30                    |

ТАБЛИЦА 2. Исходное содержание подвижного алюминия в породе разной степени метаморфизации

| Отвальная порода                 | Степень метаморфизации | Содержание подвижного алюминия, мг/100 г породы |
|----------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------|
| В стадии горения (г. Свердловск) | Сильная                | 0,08                                            |
| Перегоревшая (г. Антрацит)       | Сильная                | 0,07                                            |
| Свежеотсыпанная (г. Луганск)     | Средняя                | 0,02                                            |
| Перегоревшая (г. Лисичанск)      | Слабая                 | 0,05                                            |

Большее содержание подвижной формы алюминия в отвальной породе сильной степени метаморфизации можно объяснить тем, что антрациты и сопутствующие им породы характеризуются высокой естественной влажностью, а в процессе регулярного внешнего увлажнения (например, атмосферными осадками) имеет место повышенный прирост сорбированной влаги. Это также обуславливается большей внутренней поверхностью антрацитов. В связи с этим наиболее значительные и быстрые изменения свойств химических веществ в составе отвальной породы — геохимическое окисление пирита с последующим выделением свободной серной кислоты — присущи антрацитам.

Химическое кислотное выщелачивание подвижного алюминия (сульфатных солей алюминия) проводилось с использованием растворов серной кислоты различных концентраций, %: 80, 40, 20, 10, 5 и 2,5 (рис. 1). Различные концентрации сернокислых растворов подобраны с целью выявления оптимальных показателей

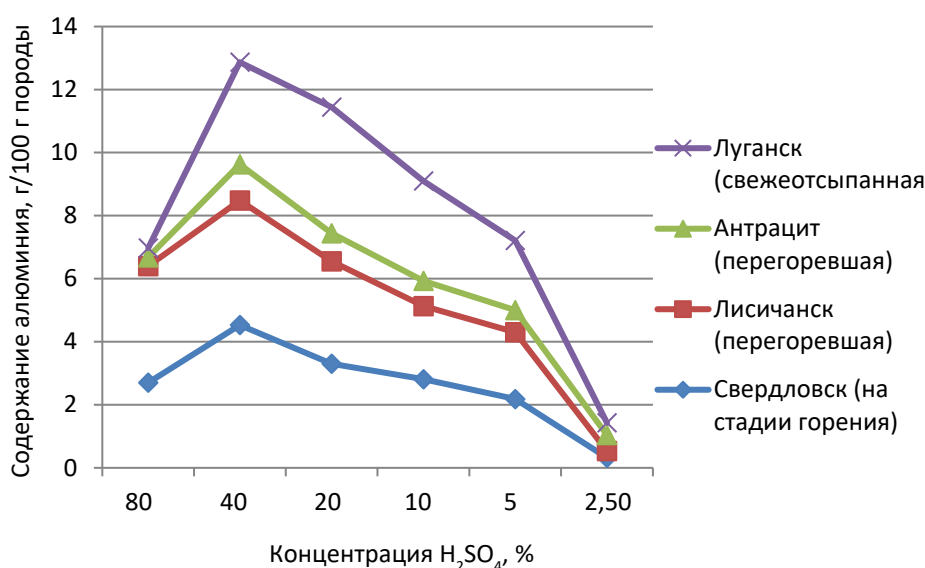


Рис. 1. Результаты кислотного выщелачивания алюминия

выщелачивания и имитирования естественных процессов образования серной кислоты при химическом и биохимическом выщелачивании сульфидных соединений железа и элементной серы.

Образцы отвальной породы подвергались измельчению, а свежееотсыпанная отвальная порода шахты «Луганская» дополнительному обжигу при 600 °С для разрушения крепких химических связей в алюмосиликатах и перевода структуры каолина в метакаолин. Однако наличие также большого числа техногенно образованных некаолинитовых минералов алюминия в отвальной породе, в отличие от каолинитов, легко выщелачиваются растворами слабой серной кислоты и даже воды (например, даусонит и другие минералы). В результате эксперимента установлено, что даже слабые растворы серной кислоты (5–20 %) выщелачивают алюминий, а наибольшие показатели выщелачивания по всем образцам породы наблюдаются при 20–40 % концентрации.

Таким образом, в естественных условиях на начальных стадиях окисления пирита, образованная серная кислота даже небольших концентраций способна разрушать алюмосиликаты и

другие минералы алюминия, а самонагревание породы облегчает данный процесс.

Далее было проведено биохимическое (бактериальное) выщелачивание алюминия. Из образцов отвальной породы (водной вытяжки) была выделена культура бактерий *Th. ferrooxidans* (среда 9К Сильвермана и Ландгрена) [1, 8]. Обогащенную культуру *Th. ferrooxidans* получили путем нескольких пересевов. Соотношение твердой и жидкой фаз колебалось при условии Т : Ж = 1 : 2. Орошение породы полученными бактериальными растворами проведено однократно в начале эксперимента.

Из научной литературы известно [1, 9, 10], что один из основных источников получения энергии бактериями *Th. ferrooxidans* — это окисное железо. Его стабильное содержание поддерживается в растворе при pH менее 3. При повышении показателя pH скорость окисления может замедляться и продукты окисления будут препятствовать последующему контакту клетки со средой. Поэтому в процессе эксперимента и по его окончании проводился постоянный контроль pH среды [11] (рис. 2).

На 8-е сутки отмечено повышение содержания подвижного алюминия (табл. 3). в результате разло-

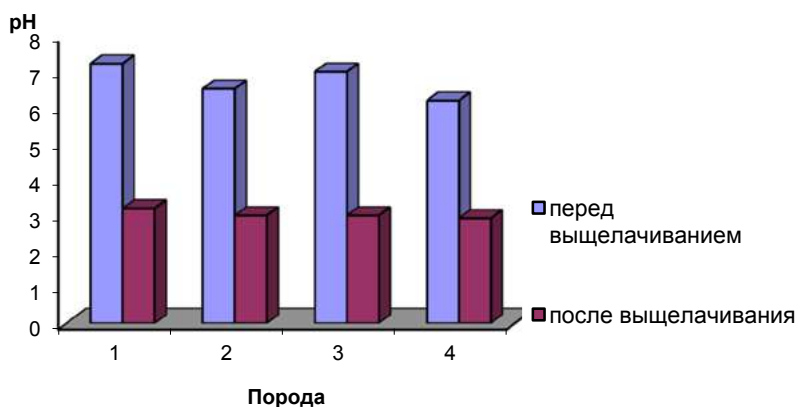


Рис. 2. Результаты изменения рН после биохимического выщелачивания:

- 1 — сильнометаморфизированная порода (г. Свердловск);
- 2 — сильнометаморфизированная порода (г. Антрацит);
- 3 — среднеметаморфизированная порода (г. Луганск);
- 4 — слабометаморфизированная порода (г. Лисичанск)

жения полевых шпатов сернокислотными продуктами жизнедеятельности бактерий *Th. ferrooxidans*.

Степень биохимического выщелачивания алюминия колеблется в относительно небольших пределах — от 16 до 63 %, что, однако, доказывает возможность утилизации породы и требует дальнейшего усовершенствования микробиологических процессов.

Процесс биохимического выщелачивания, его скорость и результат будут зависеть от таких факторов, как количество клеток бактерий в растворе, аэрация отвальной породы и ее гранулометрического состава, высота отвала и количество сульфидных минералов в составе отвальной породы. Полученный в результате выщелачивания продукт — сульфатные соли алюминия — могут иметь широкий спектр применения в качестве коагулянта в очистных системах (при очистке сточных вод и питьевой воды) как компонент пестицидов в сельском хозяйстве, в текстильном производстве и в печатно-издательском деле, в металлургии и в других отраслях.

Также из полученного сульфата алюминия после его гидролитического выделения возможно получать глинозем термическим разложением сульфата алюминия. Вместе с основным товарным продуктом (глиноземом) выделяются также

ТАБЛИЦА 3. Результаты биохимического кислотного выщелачивания алюминия

| Отвальная порода                 | Содержание $Al^{3+}$ , г/100 г породы | Степень извлечения, % |
|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| В стадии горения (г. Свердловск) | 5,86                                  | 30                    |
| Перегоревшая (г. Антрацит)       | 3,0                                   | 16                    |
| Свежеотсыпанная (г. Луганск)     | 8,91                                  | 63                    |
| Перегоревшая (г. Лисичанск)      | 5,0                                   | 28                    |

отходящие газы — оксиды серы, которые целесообразно включать в замкнутый цикл и использовать для получения серной кислоты, используемой для дальнейшего выщелачивания алюминия. Таким образом, данный способ получения глинозема будет характеризоваться малоотходностью.

Реализация предложенного биохимического способа выщелачивания возможна на территории закрытых шахт, что позволит существенно снизить расходы на строительство технологических комплексов и т. п. Закрытые шахты имеют железнодорожное и автомобильное сообщение, что также является существенным экономическим фактором создания комплекса биохимического выщелачивания металлов. Отходы выщелачивания целесообразно использовать в жилищ-

ном строительстве для производства кирпича, керамзита и другой продукции, а также для производства материалов, используемых в дорожном строительстве. Максимально полная утилизация отвальной породы угольных шахт с получением товарного продукта и использование отходов утилизации создаст экологически безопасную и экономически выгодную технологию.

## Выводы

Проведенная оценка химических и биохимических превращений в складированной породе показала, что естественные биохимические процессы образования серной кислоты ускоряют разложение алюмосиликатов, что приводит к образованию каолина и высвобождает изоморфно замещенные металлы. Эти биохимические процессы можно использовать при переработке породы как бедного техногенного сырья для получения алюминия. Экспериментально доказано, что даже слабые растворы серной кислоты (5–20 %) выщелачивают алюминий, а наибольшие показатели выщелачивания по всем образцам породы наблюдаются при 20–40 % концентрации. Степень биохимического выщелачивания алюминия колеблется в относительно небольших пределах — от 16 до 63 %. Биохимическое выщелачивание алюминия может характеризоваться как более дешевое и экологически чистое, потому что серная кислота производится естественно в поровых растворах отвальной породы как следствие жизнедеятельности бактерий *Th. ferrooxidans*. Внедрение предложенных схем позволит существенно улучшить экологическое и экономическое состояние региона.

## Библиографический список

1. Зборщик М. П. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений / М. П. Зборщик, В. В. Осокин. — Донецк: ДонГТУ, 1996. — 178 с.
2. Зборщик М. П. Условия самонагревания пиритсодержащих осадочных горных пород / М. П. Зборщик, В. В. Осокин, Ю. Н. Паниотов // Горный журнал. — 1990. — № 11. — С. 9–16.
3. Панов Б. С. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса / Б. С. Панов, Ю. А. Проскурня // Геология угольных месторождений. — Екатеринбург, 2002. — С. 274–281.
4. Верех-Белоусова Е. И. Эколого-геохимическое обоснование возможности переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины / Е. И. Верех-Белоусова, Т. С. Титова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15. — Вып. 3. — СПб.: ПГУПС, 2018. — С. 463–470.
5. Верех-Белоусова Е. И. К вопросу экологически безопасных способов переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины / Е. И. Верех-Белоусова // Научно-практический журнал «Безопасность жизнедеятельности». — 2019. — № 4(220). — М.: Новые технологии, 2019. — С. 42–46.
6. Проскурня Ю. А. Минералогия отвалов угольных шахт Донбасса (на примере Донецко-Макеевского промышленного района): автореф. дис. на получение науч. степени канд. геол. наук / Ю. А. Проскурня. — Кривой Рог, 2000. — 19 с.
7. Шпирт М. Я. Использование твердых отходов добычи и переработки углей / М. Я. Шпирт, В. Б. Артемьев, С. А. Силютин. — М.: Горное дело, ООО «Киммерийский центр», 2013. — 432 с.
8. Мейнелл Дж. Экспериментальная микробиология: теория и практика / Дж. Мейнелл, Э. Мейнелл. — М.: Мир, 1967. — 347 с.
9. Татаринов А. В. Роль микроорганизмов в гипергенном преобразовании полиметаллических руд и формировании биогеохимических аномалий благородных металлов на месторождениях Забайкалья / А. В. Татаринов, Л. И. Яловик, Э. В. Данилова // Доклады АН РФ. — 2007. — Т. 414. — № 5. — С. 651–655.
10. Зарубина З. М. Исследование микробиологического окисления пирита угля / З. М. Зарубина, Н. Н. Ляли-



кова, Е. И. Шмук // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. — 1959. — № 1. — С. 26–31.

11. Верех-Белюсова Е. И. Перспективы извлечения редкоземельных металлов из породных отвалов угольных шахт Луганщины / Е. И. Верех-Белюсова // Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования: материалы II Национальной научно-практической конференции (г. Керчь, 15–17 мая 2019 г.). — Симферополь: ФГБУО ВО «КГИТУ»; АТ «Ариал», 2019. — С. 150–156.

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 18.02.2023

#### Контактная информация:

ВЕРЕХ-БЕЛОУСОВА Екатерина Иосифовна —

канд. техн. наук, доц.;

kate3152@yandex.ru

ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна —

канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru

## Environmentally Safe Trends of Coal Mining Waste Usage as Aluminum Technogenic Raw Material

E. I. Verekh-Belousova<sup>1</sup>, A. V. Kharlamova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lugansk Vladimir Dahl State University, 20a, Molodezhnykv., Lugansk, 91034, LPR, Russian Federation

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

**For citation:** Verekh-Belousova E. I., Kharlamova A. V. Environmentally Safe Trends of Coal Mining Waste Usage as Aluminum Technogenic Raw Material // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 142–150. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-142-150

### Summary

**Purpose:** Substantiation and development of new environmentally safe trends for utilization of dump rock of Donbass coal mines as technogenic aluminum deposits. To investigate mineralogical and chemical composition of dump rock samples of metamorphism varying degrees in order to substantiate the possibility of their processing as technogenic poor aluminum raw material. To conduct the experiments on chemical and biochemical (bacterial) leaching of fluid (soluble) aluminum compounds from dump rock samples. **Methods:** Analysis of chemical transformations and technogenic mineralogy in stored dump rock. Chemical and biochemical acid leaching of aluminum sulfate salts from dump rock of metamorphism varying degrees was carried out. **Results:** It has been established that according to the content of bauxites, the dump rock of Donbass coal mines can be attributed to poor aluminum raw material. Method of acid chemical leaching of soluble aluminum compounds with sulfuric acid solutions of various concentrations is proposed and effective leaching with weak acid solutions is proved. Method of biochemical (bacterial) leaching of aluminum salts is substantiated and vindicated. **Practical significance:** It is testified that environmental friendliness and cost-effectiveness of the process of closely-grouped biochemical leaching is ensured by the fact that the main reagent — sulfuric acid - is formed naturally as a result of bacteria vital functions and the process does not need additional technological units for acid production.

**Keywords:** Mines, rock dumps, waste recycling, acid leaching, bacteria *Th. ferrooxidans*, aluminum.

### References

1. Zborshchik M. P., Osokin V. V. *Predotvrashchenie ekologicheski vrednykh pojavlenij v porodah ugol'nykh mestoro-*

*zhdenij* [Prevention of environmentally harmful manifestations in the rocks of coal deposits]. Doneck: DonGTU Publ., 1996, 178 p. (In Russian)

2. Zborshhik M. P., Osokin V. V., Paniotov J. N. Usloviya samonagrevaniya piritosoderzhashhih osadochnykh gornykh porod [Conditions of self-heating of pyrite-containing sedimentary rock pores]. *Gornyy zhurnal* [Mining Magazine]. 1990, Iss. 11, pp. 9–16. (In Russian)
3. Panov B. S., Proskurnja Ju. A. Model' samovozgoraniya porodnykh otvalov ugol'nykh shaht Donbassa [Model of spontaneous combustion of rock dumps of Donbass coal mines]. *Geologiya ugol'nykh mestorozhdenij* [Geology of Coal Deposits]. Ekaterinburg, 2002, pp. 274–281. (In Russian)
4. Vereh-Belousova E. I., Titova T. S. Jekologo-geokhimicheskoe obosnovanie vozmozhnosti pererabotki porodnykh otvalov ugol'nykh shaht Luganshhiny [The possibility of processing rock dump of the Lugansk region coal mines: environmental and geochemical justification]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2018, vol. 15, Iss. 3. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2018, pp. 463–470. (In Russian)
5. Vereh-Belousova E. I. K voprosu jekologicheskii bezopasnykh sposobov pererabotki porodnykh otvalov ugol'nykh shaht Luganshhiny [Regarding Environmentally Safe Methods for Processing Coal Mine Waste Rock Dumps in Lugansk Region]. *Nauchno-prakticheskij zhurnal "Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti"* [Life Safety]. 2019, Iss. 4(220). Moscow: Novye tehnologii Publ., 2019, pp. 42–46. (In Russian)
6. Proskurnja Ju. A. *Mineralogiya otvalov ugol'nykh shaht Donbassa (na primere Donecko-Makeevskogo promyshlennogo rajona): avtoref. dlss. na poluchenie nauch. Stepeni kand. geolog. nauk* [Mineralogy of dumps of Donbass coal mines (on the example of the Donetsk-Makeevsky industrial region): author. dis. to receive scientific degree cand. geologiSt. sciences]. Krivoj Rog, 2000, 19 p. (In Russian)
7. Shpirt M. Ja., Artem'ev V. B., Siljutin S. A. *Ispol'zovanie tverdykh othodov dobychi i pererabotki uglej* [Use of solid wastes of coal mining and processing]. Moscow: Gornoe delo, OOO "Kimmerijskij centr" Publ., 2013, 432 p. (In Russian)
8. Mejnell Dzh., Mejnell Je. *Jeksperimental'naja mikrobiologija: teorija i praktika* [Experimental microbiology: theory and practice]. Moscow: Mir Publ., 1967, 347 p. (In Russian)
9. Tatarinov A. V., Jalovik L. I., Danilova Je. V. Rol' mikroorganizmov v gipergennom preobrazovanii polimetallicheskich rud i formirovanii biogeokhimicheskikh anomalij blagorodnykh metallov na mestorozhdeniyakh Zabaykal'ya [The role of microorganisms in the hypergene transformation of polymetallic ores and the formation of biogeochemical anomalies of noble metals in the deposits of Transbaikalia]. *Doklady AN RF* [Doklady AN RF]. 2007, vol. 414, Iss. 5, pp. 651–655. (In Russian)
10. Zarubina Z. M., Ljalikova N. N., Shmuk E. I. Issledovanie mikrobiologicheskogo okisleniya pirita uglja [Investigation of microbiological oxidation of coal pyrite]. *Izv. AN SSSR. Otdelenie tehnikeskikh nauk* [The news of the Academy of Sciences of USSR. Department of Technical Sciences]. 1959, Iss. 1, pp. 26–31. (In Russian)
11. Vereh-Belousova E. I. *Perspektyvy izvlecheniya redkozemel'nykh metallov iz porodnykh otvalov ugol'nykh shaht Luganshhiny. Aktual'nye problemy bioraznoobraziya i prirodoopol'zovaniya: materialy II Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Kerch', 15–17 maya 2019 g.)* [Prospects for the extraction of rare earth metals from rock dumps of coal mines in the Luhansk region. Actual problems of biodiversity and nature management: materials of the II National scientific and practical conference (Kerch, 15–17 May, 2019)]. Simferopol': FGBOU VO "KGITU"; AT "Arial" Publ., 2019, pp. 150–156. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 18, 2023

#### Author's information:

Ekaterina I. VEREKH-BELOUSOVA —  
PhD in Engineering, Associate Professor;  
kate3152@yandex.ru

Alina V. KHARLAMOVA — PhD in Engineering,  
Associate Professor; alavina@yandex.ru

УДК 007.52

## Декомпозиция процессов управления данными в CMDB

А. К. Канаев, Э. В. Логин, К. А. Пудовкина

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

**Для цитирования:** Канаев А. К., Логин Э. В., Пудовкина К. А. Декомпозиция процессов управления данными в CMDB // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 151–160. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-151-160

### Аннотация

**Цель:** Разработка декомпозиции и классификации данных для управления конфигурациями телекоммуникационных сетей и формирование множества процессов управления такими данными с применением специальной базы данных, на основании чего сформирование требований для проектирования подсистемы базы данных с учетом согласованности данных об объекте управления и возможностей системы управления этим объектом. Систематизация данных конфигурации, атрибутов конфигурационных элементов, а также их логическая согласованность с процессами контроля и управления состоянием в подсистемах перспективной системы управления. **Методы:** Основы теории управления сложными процессами, теория систем хранения и представления информации, методы объектно-ориентированного проектирования, метод декомпозиции для представления логики процессов и анализа данных об объекте управления, а также теоретико-множественный подход для описания множества данных. **Результаты:** Получена декомпозиция задач, реализуемых компонентами специальной базы данных управления конфигурацией телекоммуникационной сети, сформированы наборы данных о конфигурационных элементах. Представлены требования к подсистеме перспективной системы управления, реализующей функционал специальной базы данных для управления конфигурационными элементами телекоммуникационной сети. Предложены направления дальнейшего исследования в направлении разработки алгоритмов и моделей процессов управления конфигурацией телекоммуникационной сетью с помощью специальной базы данных. **Практическая значимость:** Полученная декомпозиция и классификация данных для управления конфигурациями телекоммуникационных сетей отличается уникальным подходом и ориентированностью на требуемую для перспективного проектирования логическую структуру подсистем систем управления телекоммуникационной сетью, а также позволяет сформулировать требования для моделирования процессов управления конфигурационными элементами телекоммуникационной сети.

**Ключевые слова:** Телекоммуникационная сеть, система управления, объектно-ориентированная база данных, база знаний, CMDB, конфигурация сети связи, управления конфигурацией сети связи, конфигурационные элементы.

### Введение

В современном мире информационных технологий управление конфигурациями (Configuration Management) становится все более важным аспектом для успешной работы телекоммуникационных сетей. CMDB (Configuration Management Database)

является центральным элементом системы управления конфигурациями, который позволяет хранить, управлять и отслеживать информацию о компьютерном оборудовании, программном обеспечении, сетевых устройствах, приложениях и других элементах информационной инфраструктуры.

Эффективность управления в телекоммуникационных сетях в большей степени зависит от оперативного получения, обработки, хранения и анализа предоставленных данных о конфигурации, состояния средств и сетей связи [1]. Данная задача как раз и решается в рамках специальной базы данных управления конфигурацией (Configuration Management Database, CMDB) — база данных, которая хранит информацию о конфигурационных элементах (Configuration Items, CI) и их отношениях в информационной инфраструктуре сетей связи. CI — это строительные блоки IT-инфраструктуры, и они могут быть аппаратными средствами, программным обеспечением, сетями или сервисами. CMDB записывает атрибуты каждого CI, такие как его местоположение, версия и статус. В нем также записываются взаимосвязи между CI — зависимости между программным и аппаратным обеспечением или взаимосвязи между различными службами. Одним из главных преимуществ использования CMDB является возможность контролировать и управлять изменениями, а также своевременно реагировать на инциденты. Главное назначение CMDB — хранение конфигурационных элементов и связей между ними, которые совместно определяют конфигурацию в определенное время или в определенном состоянии [2].

### **Функции, задачи и процессы конфигурационных элементов**

Для эффективного управления конфигурациями необходимо создать такую CMDB, которая будет содержать информацию о всех компонентах IT-инфраструктуры, их зависимостях и связях между ними. Важно также определить процессы и правила, которые будут использоваться для управления изменениями в IT-инфраструктуре.

Внедрение CMDB для управления конфигурациями телекоммуникационных сетей имеет ряд преимуществ. К ним относятся:

1. Улучшенное управление: CMDB предоставляет централизованное хранилище информации, что облегчает эффективное управление данными.

2. Улучшенное управление: CMDB помогает предоставлять более качественные услуги, используя всесторонний анализ элементов конфигурации и их взаимосвязи. Это позволяет быстро выявлять проблемы и эффективно их устранять.

3. Сокращение времени бездействия: CMDB помогает сократить время бездействия, предоставляя точную и актуальную информацию о состоянии телекоммуникационной сети. Это позволяет выявлять потенциальные риски и принимать упреждающие меры по их снижению.

Конфигурационные элементы (Configuration Items, CI) являются ключевым звеном в управлении конфигурациями. Конфигурационные элементы могут быть материальными объектами, такими как компьютеры, маршрутизаторы и другие устройства, а также системными или прикладными программными продуктами и компонентами, базами данных, файлами, потоками данных, нормативными (техническими) документами, логическими или виртуальными объектами, например серверными кластерами или группами устройств [3]. Конфигурация в данном контексте относится к функциональным и физическим характеристикам телекоммуникационного ресурса, которые устанавливают требования к проектированию, верификации и эксплуатации этих ресурсов. Каждый конфигурационный элемент представляет собой отдельный экземпляр объекта, который является частью среды и обладает изменяемыми атрибутами.

Понятие «конфигурационные элементы» — ключевое звено CMDB. Конфигурационный элемент — это отдельный экземпляр объекта, являющийся частью среды и обладающий изменяемыми атрибутами. Данные экземпляры могут быть физическими, логическими или процессными. Физические конфигурационные экзем-

пляры объектов относятся к параметрическому множеству состояний устройств транспортной сети связи. Логические представляют собой установленные копии программного обеспечения или сетевых настроек. Процессные конфигурационные элементы связаны с событиями изменений, соглашениями об уровне обслуживания (SLA), библиотекой эталонного программного обеспечения (DSL) и другими видами информации [4].

Конфигурационные элементы представляют собой неотъемлемую часть IT-инфраструктуры, так как содержат информацию о состоянии компонентов, программном обеспечении и данных, которые используются для поддержания и оптимизации работы системы. В управлении конфигурациями конфигурационные элементы используются для контроля за изменениями, управления версиями, планирования изменений и мониторинга событий в инфраструктуре.

Для декомпозиции процессов управления данными в CMDB необходимо определить параметры конфигурации, которые являются существенной характеристикой телекоммуникационного

ресурса, а также адаптация, которая является процессом направленного изменения значения параметров конфигурации для достижения поставленной цели в управлении конфигурацией. Тщательный выбор модели данных с целью соответствия потребностям конфигурации позволяет повысить качество таких процессов, как управление инцидентами и изменениями.

На рис. 1 изображена структура CMDB с переходом от процессов к объектам для выполнения соответствующих задач, представленных в табл. 1. На данной структурной схеме тактический уровень определяет количество и мощность оборудования на узлах связи, оперативный — осуществляет настройку параметров телекоммуникационных ресурсов для обслуживания пользователей с высоким качеством и адаптацией данных параметров под характеристики сети. Функции, задачи и процессы элементов конфигурации включают в себя идентификацию самих элементов, исходные условия: является ли элемент физическим объектом (оборудование сетей, линий, средств и сооружений связи) или же логи-

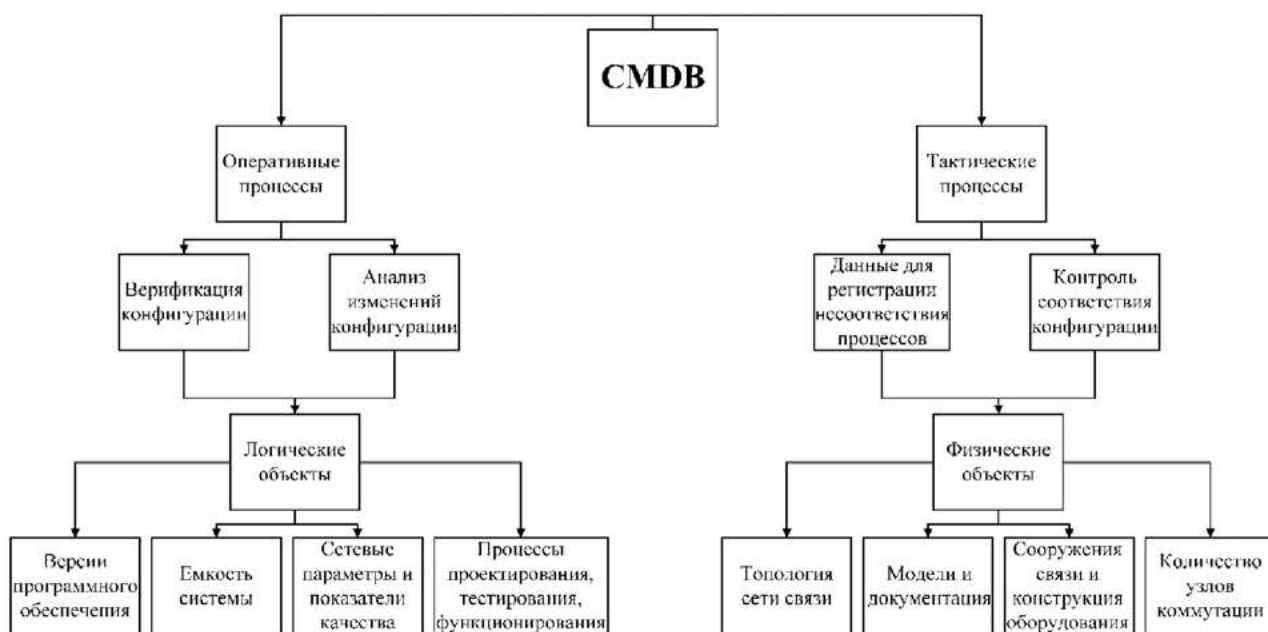


Рис. 1. CMDB как системный репозиторий данных для управления конфигурацией

ческим (программное обеспечение, которое применяется в ТрС), контроль, учет состояния и составление отчетов по состоянию элементов.

Согласно ITIL, CMDB должно выполнять:

- хранение информации о конфигурационных элементах (CI);
- ведение документации и предоставление точной информации о конфигурациях для поддержки других процессов;
- управление инцидентами;
- управление изменениями;
- ведение истории о стабильной основе для управления возникающими инцидентами, проблемами и изменениями;
- управление рисками;
- решение проблем расхождений данных о конфигурационных элементах [5].

Для наглядности функций, задач и процессов, выполняемых с помощью конфигурационных элементов, была составлена табл. 1.

Примерная архитектура описанной конфигурационной базы данных представлена на рис. 2. Она полностью отражает функционал описываемой перспективной подсистемы CMDB (табл. 1). А каждый элемент архитектуры можно аналогично представить методом декомпозиции на процессы, атрибуты и наборы поступающих данных из различных источников. Также CMDB позволяет получить не только централизованный доступ ко всем видам информации, характеризующей конфигурационные экземпляры элементов, но и доступ к функциям управления.

Система управления данными о конфигурации должна обеспечивать высокое «качество обслуживания» (QoS) для пользователей, предоставляя необходимые услуги в виде аналоговых или цифровых сигналов. Это достигается путем минимизации ошибок и искажений сигналов при передаче и приеме данных. QoS — это механизм управления качеством телекоммуникационных ресурсов, кото-



Рис. 2. Архитектура конфигурационной базы данных (CMDB)

ТАБЛИЦА 1

| Функции                                     | Задачи                                                                                                                                                                   | Процессы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Набор данных о конфигурационных элементах                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Физ                                                                                                                                                                                                                                        | Лог                                                                                                                                                                                                                             | Процесс                                                                                                                                                                                                              |
| Классификация телекоммуникационных ресурсов | Формирование множества классификаций для запросов.<br>Нарращивание структуры телекоммуникационных ресурсов                                                               | Составление структуры соответствия запроса выбранной классификации.<br>Распределение ресурсов                                                                                                                                                                                                                                            | Характеристики линейных и сетевых устройств                                                                                                                                                                                                | Множество объектов для процесса выполнения соответствия структуре                                                                                                                                                               | Ресурсы информационной модели                                                                                                                                                                                        |
| Идентификация телекоммуникационных ресурсов | Выполнение соответствия ресурсов установленной структуре                                                                                                                 | Определение соответствия структуре.<br>Формирование запросов, соответствующих классификации.<br>Алгоритм соответствия ресурсов информационной модели                                                                                                                                                                                     | Спецификации и диаграммы                                                                                                                                                                                                                   | Идентификация требований к продукту.<br>Идентификация изменений в данных                                                                                                                                                        | Правила идентификации и нумерации                                                                                                                                                                                    |
| Сбор, хранение и предоставление данных      | Повышение эффективности и скорости обработки.<br>Модернизация телекоммуникационного ресурса                                                                              | Осуществление контроля за расширением или уменьшением состава и конфигурации сетей, средств и устройств связи                                                                                                                                                                                                                            | Состав, конструкция, размещение и взаимосвязи идентифицируемых сетей.<br>Оборудование и аппаратура                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                      |
| Контроль соответствия конфигурации          | Определение способов изменения конфигурации.<br>Формирование конфигурации с лучшим качеством предоставляемых услуг                                                       | Изменение конфигурации – состав сети и ее элементы, версия и состав программного обеспечения.<br>Адаптация конфигурации                                                                                                                                                                                                                  | Емкость сети связи, количество узлов коммутации, количество портов, мощность передатчика, топология сети.<br>Спецификации, модели, документация                                                                                            | Виды и параметры маршрутизации, версии программного обеспечения, емкость системы.<br>Критерии утверждения изменений                                                                                                             | Настройка и адаптация параметров телекоммуникационных ресурсов для обслуживания с требуемым качеством.<br>Организация контроля изменений                                                                             |
| Верификация конфигурации                    | Добиться соответствия установленным требованиям по качеству сервиса QoS.<br>Взаимодействие между элементами объекта.<br>Предоставление информации, используемой системой | Установление действующих значений параметров.<br>Установление значений параметров, характеризующих качество обслуживания.<br>Сравнение с ранними значениями конфигурации и выявление расхождений.<br>Нарращивание, модернизация, распределение сетевых ресурсов путем соответствующего управления сетью.<br>Обеспечение доступности сети | Временные задержки.<br>Потери.<br>Непрерывность сеансов связи.<br>Аналоговые/цифровые сигналы.<br>Требования пользователей к объему.<br>Скорость передачи.<br>Сетевые параметры и показатели, отражающие качество<br>Сеть телекоммуникаций | Показатели качества услуги.<br>Семантическая модель — максимально/минимально допустимый уровень, рабочий уровень, вспомогательные параметры (ограничения значений) QoS.<br>Управление доступом к объекту.<br>Выделение ресурсов | Регулирование работы объекта.<br>Опрос, предупреждение, фильтрация.<br>Синхронизация (временное соответствие, целостность и связность).<br>Проектирование услуги.<br>Тестирование услуги.<br>Функционирование услуги |

Окончание табл. 1

| Набор данных о конфигурационных элементах                                                                                                                                                     |                                                                 |                                                                                                                                                           | Процессы                                                                                                                                          | Задачи                                                                                                                                                                     | Функции                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Физ                                                                                                                                                                                           | Лог                                                             | Процесс                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                       |
| Комбинаторные оптимизационные модели — надежность, производительность, мониторинг.<br>Частичное/полное перепроектирование для улучшения качества                                              |                                                                 |                                                                                                                                                           | Анализ конфигурации.<br>Определение необходимости, способов и методов изменения текущей конфигурации для достижения цели управления конфигурацией | Исследование параметров телекоммуникационных ресурсов на предмет обеспечения требуемого качества услуг и соответствия техническим возможностям организации связи           | Синтез (формирование) конфигурации                                                                                                    |
| Узлы сети.<br>Каналы связи.<br>Сетевое программное обеспечение                                                                                                                                |                                                                 |                                                                                                                                                           | Подключение дополнительных узлов для изменения трафика в сети.<br>Изменение типа трафика (вне-сетевое изменение в архитектуру сети)               | Изменение сети с целью улучшения процессов функционирования и соответствия действующей конфигурации                                                                        | Реконфигурация сети и сетевых ресурсов                                                                                                |
| Емкость сети связи, количество узлов коммутации, количество портов, мощность передатчика, состав, конструкция, размещение и взаимосвязи идентифицируемых сетей.<br>Оборудование и аппаратура. | Виды и параметры маршрутизации, версии программного обеспечения | Ведение истории состояний утвержденных изменений.<br>Ведение истории верификации конфигурации.<br>Ведение истории состояний телекоммуникационных ресурсов | Анализ дефектов.<br>Регистрация несоответствия процессов.<br>Модификация сетевых элементов                                                        | Возможность внедрения различных вариантов модификаций элементов конфигурации на основе интеллектуальных методов анализа данных                                             | Ведение истории и анализ влияний изменений конфигурации идентифицируемых элементов, используемых для анализа и предсказания состояний |
| Оборудование<br>Параметры ресурсов                                                                                                                                                            |                                                                 |                                                                                                                                                           | Настройка и адаптация параметров ресурсов для обслуживания с требуемым качеством.<br>Определение количества и мощности оборудования               | Повышение качества обмена информацией и обслуживания.<br>Поддержка двусторонних и иерархических связей между элементами конфигурации; возможность расширения модели данных | Интеграция с оперативными и тактическими процессами                                                                                   |
| Атрибуты системы                                                                                                                                                                              |                                                                 |                                                                                                                                                           | Интеграция (хранение данных в центральном репозитории) атрибутов.<br>Интеграция данных, относящихся к конфигурационным элементам                  | Хранение основных атрибутов.<br>Увеличение скорости поиска.<br>Открытый доступ к данным.<br>Синхронизация конфигураций                                                     | Средства поиска по значениям атрибутов элементов конфигурации                                                                         |



рый обеспечивает определенный уровень обслуживания для пользователей и приложений. QoS используется в телекоммуникационных сетях для управления пропускной способностью, задержкой, джиттером и потерей пакетов, чтобы обеспечить соответствующий уровень качества услуг для конечных пользователей [6]. В связи с этим первоочередной задачей становится обеспечение и поддержание необходимого качества параметра QoS, что осуществляется модернизацией и распределением сетевых ресурсов с помощью соответствующего управления конфигурацией сети [7].

Для обеспечения качества обслуживания существует несколько механизмов, включая приоритизацию трафика, ограничение пропускной способности, управление очередями и маркировку пакетов. В телекоммуникационной инфраструктуре QoS может быть реализован как на уровне сетевых устройств, так и на уровне приложений. На уровне сетевых устройств QoS может быть реализован с помощью маршрутизаторов, коммутаторов и других устройств. Кроме того, требуется соответствующее оборудование и программное обеспечение, а также управление конфигурацией сети для обеспечения качества.

С учетом постоянного изменения потребностей конечных пользователей сети система должна гарантировать определенный уровень QoS или обеспечивать негарантированное использование услуг с возможностью повышения уровня QoS. Это определяется в соглашении об уровне предоставляемых услуг (SLA), учитывая потребности и требования пользователей и сетевых служб системы связи [8]. Особенности качества обслуживания необходимо рассматривать как с позиции сети телекоммуникаций, так и с позиций процессного использования продуктов сети [9].

На основе полученной структуры и таблицы с набором характеристик можно выделить стратегический, тактический и оперативный уровни контроля и управления конфигурацией [10]. Каж-

дый уровень играет важную роль в обеспечении эффективной работы сети связи и поддержании ее в актуальном состоянии.

Стратегический уровень контроля и управления конфигурацией определяет необходимость модернизации телекоммуникационного ресурса, а также определение общей стратегии управления конфигурацией, включая определение стандартов и процессов управления, а также выделение ресурсов для их реализации. Также определяются цели и задачи, направленные на обеспечение эффективной работы сети связи, и планируются долгосрочные мероприятия, такие как обновление оборудования и внедрение новых технологий.

Тактический уровень определяет количество и мощность оборудования на узлах связи, а также включает в себя планирование и координацию действий на более короткий период времени. На этом уровне определяются конкретные мероприятия и процессы, направленные на контроль и управление конфигурацией, а также выделяются ресурсы для их реализации. Кроме того, на этом уровне определяются сроки и бюджеты, необходимые для реализации задач по управлению конфигурацией.

Оперативный уровень осуществляет настройку параметров телекоммуникационных ресурсов для обслуживания пользователей с требуемым качеством, а также для достижения всех целей потребителя проводится ежедневный контроль состояния сети. На этом уровне происходит мониторинг и анализ состояния сети, выявление и устранение неполадок, а также внесение изменений в конфигурацию сети в соответствии с задачами и целями, определенными на более высоких уровнях управления [11].

Для эффективного управления конфигурацией сети связи необходимо обеспечить согласованность и совместимость процессов на всех уровнях. На каждом уровне должны быть определены соответствующие процессы и инструменты управления, а также выделены ресурсы для их реализации. Должны быть разработаны стан-

дарты управления конфигурацией, которые будут обеспечивать единый подход к управлению конфигурацией на всех уровнях.

Существует множество инструментов и технологий, которые могут быть использованы для управления конфигурацией сети связи на всех уровнях управления.

## Заключение

Управление конфигурацией телекоммуникационной сети включает не только сбор и предоставление данных о настройках ее отдельных устройств, но и функционал локальной базы данных, а также методы анализа данных и процессы, на основе которых производится непосредственно управление и удаленная настройка сетевых устройств. На каждом этапе фигурирует множество разнородных типов данных (от логических до фактически данных о техническом состоянии, например). В работе предложена классификация указанных наборов данных и декомпозиция функций и задач CMDB для управления телекоммуникационной сетью, что позволит формировать требования на этапе проектирования подсистем системы управления к характеристикам компонентов перспективной CMDB и соответствие этих требований характеристикам существующей системы управления. На основании полученного результата возможно сформировать алгоритм управления данными CMDB с последующим моделированием соответствующих процессов.

## Библиографический список

1. Гребешков А. Ю. Функциональные задачи контроля и управления конфигурацией в современных телекоммуникациях / А. Ю. Гребешков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2011. — Т. 5. — № 7. — С. 49–51.
2. Гребешков А. Ю. Управление и технический учет ресурсов в телекоммуникациях / А. Ю. Гребешков. — М.: ИРИАС, 2008. — 326 с.
3. Леинванд А. Конфигурирование маршрутизаторов Cisco / А. Леинванд, Б. Пински; пер. с англ. и редакция

А. А. Голубченко. — 2-е изд., перераб и доп. — М.: Вильямс, 2001. — 298 с.

4. Канаев А. К. Информационная модель учета и управления данными о конфигурации сети в интересах системы управления сети связи специального назначения / А. К. Канаев, А. Н. Копытин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах. — 2015. — Т. 2. — С. 1280–1285.

5. Информационные системы и стратегии. — URL: <https://infsys.ru/resursy/solution/cmdb-solution1.html>.

6. Гавриленко Т. В. Представление знаний о динамической предметной области методами теоретико-множественного анализа: дисс. ... канд. техн. наук / Т. В. Гавриленко, Ф. Ф. Иванов. — 2004. — 174 с.

7. Логин Э. В. Анализ и классификация существующих систем управления телекоммуникационными сетями / Э. В. Логин // Труды 69-ой Международной научно-технической конференции, посвященной Дню радио. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — С. 229–230.

8. Корнеев В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. В. Корнеев, А. Ф. Гареев, С. В. Васютин и др. — М.: Нолидж, 2000. — 352 с.

9. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: Пер. с англ. / Г. Буч. — М.: Конкорд, 1992. — 519 с.

10. Гавриленко Т. В. Формализованная объектно-ориентированная модель знаний предметной области / Т. В. Гавриленко, Ф. Ф. Иванов // Системный анализ и обработка информации в интеллектуальных системах: сб. науч. тр. каф. ИВТ. № 2 / Под общ. ред. Ф. Ф. Иванова; Сургут, гос. ун-т. — Сургут: Изд-во СурГУ, 2003. — С. 79–83.

11. Вениаминов Е. М. Алгебраические методы теории баз данных и баз знаний / Е. М. Вениаминов. — М.: Научный мир, 2003. — 184 с.

Дата поступления: 28.02.2023

Решение о публикации: 01.03.2023

## Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — д-р техн. наук, проф. кафедры «Электрическая связь»; [kanaev@pgups.ru](mailto:kanaev@pgups.ru)  
ЛОГИН Элина Валерьевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Электрическая связь»; [elinabeneta@yandex.ru](mailto:elinabeneta@yandex.ru)  
ПУДОВКИНА Ксения — студент группы АС-908, кафедра «Электрическая связь»; [serde4ko01@bk.ru](mailto:serde4ko01@bk.ru)

## Decomposition of Data Management Processes in Configuration Management DataBase (CMDB)

A. K. Kanaev, E. V. Login, K. A. Pudovkina

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

**For citation:** Kanaev A. K., Login E. V., Pudovkina K. A. Decomposition of Data Management Processes in Configuration Management DataBase (CMDB) // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 151–160. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-151-160

### Summary

**Purpose:** Data decomposition and classification development for the management of telecommunication network configurations and for the formation of such data management process set with the use of special database which basis on, the formation of requirements for database subsystem projection given the consistency of data about a control object and the system capabilities for this object management. Systematization of configuration data, of configuration element attributes as well as their logical consistency with the processes of the control and management of a state in promising management system subsystems. **Methods:** Fundamentals of complex process management theory, information storage and presentation system theory, object-oriented projection methods, decomposition method for representing process logic and data analysis about control object as well as theoretic-set approach for describing data set. **Results:** Decomposition of the tasks has been obtained which are realized by the components of telecommunication network configuration management special database; data sets about configuration elements have been formed. The requirements for promising control system subsystem that embodies the functionality of special database for telecommunications network configuration element management have been presented. Trends for further research in the direction to develop algorithms and models of telecommunication network configuration management with the help of special database have been proposed. **Practical significance:** The obtained decomposition and classification of data for telecommunication network configuration management is characterized by unique approach and dedication to telecommunication network management system subsystem logical structure, required for promising projection, as well as allows to formulate requirements for modeling the processes of telecommunication network configuration element management.

**Keywords:** Telecommunication network, management system, object-oriented database, knowledge base, CMDB, communication network configuration, communication network configuration management, configuration elements.

### References

1. Grebeshkov A. Yu. Funktsional'nye zadachi kontrolya i upravleniya konfiguratsiy v sovremennykh telekommunikatsiyakh [Functional tasks of control and configuration management in modern telecommunications]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and transport]. 2011, vol. 5, Iss. 7, pp. 49–51. (In Russian)

2. Grebeshkov A. Yu. *Upravlenie i tekhnicheskiy uchet resursov v telekommunikatsiyakh* [Management and technical

accounting of resources in telecommunications]. Moscow: IRIAS Publ., 2008, 326 p. (In Russian)

3. Leinvand A., Pinski B. *Konfigurirovanie mashrutizatorov Cisco; per. s angl. i redaktsiya A. A. Golubchenko. 2-e izd., pererab i dop.* [Configuring Cisco routers; per. from English. and edited by A. A. Golubchenko. 2nd ed., revised and supplementary]. Moscow: Vil'yams Publ., 2001, 298 p. (In Russian)

4. Kanaev A. K., Kopytin A. N. *Informatsionnaya model' ucheta i upravleniya dannymi o konfiguratsii seti v interesakh*

*sistemy upravleniya seti svyazi spetsial'nogo naznacheniya. Aktual'nye problemy infotelekomunikatsiy v nauke i obrazovanii: Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferentsiya: sbornik nauchnykh statey v 2 tomakh* [Information model of accounting and data management about the configuration of the network in the interests of the control system of a special-purpose communication network. Actual problems of infotelecommunications in science and education: International scientific and technical and scientific and methodological conference: a collection of scientific articles in 2 volumes]. 2015, vol. 2, pp. 1280–1285. (In Russian)

5. *Informatsionnye sistemy i strategii* [Information systems and strategies]. Available at: <https://infsys.ru/resursy/solution/cmdb-solution1.html>. (In Russian)

6. Gavrilenko T. V., Ivanov F. F. *Predstavlenie znaniy o dinamicheskoy predmetnoy oblasti metodami teoretiko-mnozhestvennogo analiza: dIss. ... kand. tekhn. nauk* [Representation of knowledge about a dynamic subject area by methods of set-theoretic analysis: dIss. ... cand. tech. Sciences]. 2004, 174 p. (In Russian)

7. Login E. V. *Analiz i klassifikatsiya sushchestvuyushchikh sistem upravleniya telekommunikatsionnymi setyami. Trudy 69-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu radio* [Analysis and classification of existing control systems for telecommunication networks. Proceedings of the 69th International Scientific and Technical Conference dedicated to Radio Day]. St. Petersburg: SPbGETU "LETI" Publ., 2014, pp. 229–230. (In Russian)

8. Korneev V. V., Gareev A. F., Vasyutin S. V. et al. *Bazy dannykh. Intellektual'naya obrabotka informatsii* [Databases. Intelligent information processing]. Moscow: Nolidzh Publ., 2000, 352 p. (In Russian)

9. Buch G. *Ob''ektno-orientirovannoe proektirovanie s primerami primeneniya: Per. s angl.* [Object-oriented design with examples of application: Per. from English]. Moscow: Konkord Publ., 1992, 519 p. (In Russian)

10. Gavrilenko T. V., Ivanov F. F. *Formalizovannaya ob''ektno-orientirovannaya model' znaniy predmetnoy oblasti. Sistemnyy analiz i obrabotka informatsii v intellektual'nykh sistemakh: sb. nauch. tr. kaf. IVT. № 2. Pod obshch. red. F. F. Ivanova; Surgut, gos. un-t* [Formalized object-oriented model of domain knowledge. System analysis and information processing in intelligent systems: collection of articles. scientific tr. cafe IWT. № 2. Under the general ed. F. F. Ivanova; Surgut, Mrs. un-t]. Surgut: SurGU Publ., 2003, pp. 79–83. (In Russian)

11. Veniaminov E. M. *Algebraicheskie metody teorii baz dannykh i baz znaniy* [Algebraic methods of the theory of databases and knowledge bases]. Moscow: Nauchnyy mir Publ., 2003, 184 p. (In Russian)

Received: February 28, 2023

Accepted: March 01, 2023

#### Author's information:

Andrey K. KANAIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, "Electrical Communication" Department; kanaev@pgups.ru

Elina V. LOGIN — PhD in Engineering, Associate Professor, "Electrical Communication" Department; elinabeneta@yandex.ru

Ksenia A. PUDOVKINA — Student, AS-908 study group, "Electrical Communication" Department; serde4ko01@bk.ru



УДК 69.059

## Безопасная эксплуатация зданий и сооружений на транспорте

**В. В. Веселов**

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

**Для цитирования:** Веселов В. В. Безопасная эксплуатация зданий и сооружений на транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 161–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171

### Аннотация

**Цель:** Выполнить анализ организации безопасной эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, их технического обслуживания, текущего ремонта и эксплуатационного контроля в части строительных конструкций. Установить несовершенства нормативно-правовых документов для проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений, разработать рекомендации по повышению качества организации безопасной эксплуатации объектов. **Методы:** Анализ нормативно-правовых документов (государственные стандарты, своды правил, технические регламенты, федеральные законы и т. п.), результатов технического обследования строительных конструкций зданий и сооружений, оценки качества строительства и эксплуатации объектов, в том числе транспортной инфраструктуры. **Результаты:** Приведен обзор и анализ организации безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры транспорта на всех этапах жизненного цикла. Надежность и работоспособность строительных конструкций зданий и сооружений на транспорте зависит от качества проектирования и наличия в проектной документации полноценного раздела по эксплуатации объекта, соответствия строительно-монтажных работ проектной документации, своевременности, полноты и качества эксплуатационного контроля, технического обслуживания и текущих ремонтов объекта. Действующие нормативно-правовые документы требуют конкретных практических рекомендаций или ссылок на нормативы, дополнения и уточнения терминологии. Рассмотрены особенности технического обслуживания, текущего ремонта и эксплуатационного контроля строительных конструкций зданий и сооружений, вопросы их оценки соответствия и состояния, а также обеспечения надежности в соответствии с действующим законодательством. **Практическая значимость:** Разработана «Инструкция по безопасной эксплуатации оснований и строительных конструкций объектов инфраструктуры Петербургского метрополитена», которая внедрена в практическую деятельность Службы тоннельных сооружений для ГУП «Петербургский метрополитен», выявлены несовершенства нормативных документов на стадии проектирования, строительства и эксплуатации, предложены рекомендации по повышению качества организации безопасной эксплуатации зданий и сооружений при разработке нормативных документов.

**Ключевые слова:** Транспортная инфраструктура, здания, сооружения, строительные конструкции, безопасная эксплуатация, техническое обслуживание, текущий ремонт, эксплуатационный контроль, обследование, мониторинг.

## Введение

Нормативно-правовые акты Российской Федерации (своды правил, государственные стандарты, технические регламенты, федеральные законы и т. п.) устанавливают требования к организации эксплуатации зданий и сооружений, в том числе для объектов транспортной инфраструктуры. Перечень нормативных документов, в результате применения которых обеспечивается соблюдение требований федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [1] на обязательной основе, устанавливается постановлением правительства Российской Федерации (последнее от 28 мая 2021 г. № 815). Данное постановление и Техрегламент [1] содержат не все необходимые документы, обеспечивающие безопасную и длительную эксплуатацию зданий и сооружений, в частности упущено обследование объектов как обязательная составляющая эксплуатации объекта, что является пробелом строительного законодательства. Недостаточно продуманные законодательные решения отмечаются также при инженерно-геологических изысканиях для строительства [2].

Несоблюдение требований норм проектными, строительными и эксплуатирующими организациями, как показывает опыт обследования ряда объектов, приводит часто к появлению существенных повреждений строительных конструкций, а иногда к возникновению разрушений и аварий [3–6], в том числе на транспортных сооружениях [7].

Механическая безопасность, надежность и работоспособность любых эксплуатируемых зданий и сооружений должны обеспечиваться: постоянным техническим обслуживанием, своевременными периодическими осмотрами и контрольными проверками, а также неизбежными текущими ремонтами и, при необходимости, мониторингом состояния строительных кон-

струкций и систем инженерно-технического обеспечения [8].

Принципиальная схема организации безопасной и безаварийной эксплуатации объектов (зданий и сооружений) в соответствии с действующим законодательством РФ приведена на рис. 1.

## Практическое применение и результаты

Требования к эксплуатации зданий и сооружений, в том числе на транспорте, устанавливаются проектной документацией, нормативными документами, положениями и правилами [9–11]. Как показывает практический опыт обследования ряда объектов транспортной инфраструктуры, в проектной документации отсутствуют положения по эксплуатации либо разработанный раздел по эксплуатации носит формальный усеченный характер, что не позволяет зачастую владельцу обеспечить качественную и безаварийную длительную эксплуатацию здания, сооружения. В этом случае собственник объекта может самостоятельно, как правило, с привлечением специализированных организаций выполнить разработку внутренних инструкций, норм или правил безопасной эксплуатации здания, сооружения, что фактически выполняется крайне редко. При этом качественная эксплуатация объекта должна обеспечиваться подтверждением, поддержанием, а также восстановлением характеристик надежности и безопасности (далее — ХНиБ), в том числе для объектов транспортной инфраструктуры [1].

Приведенные в статье положения по организации безопасной эксплуатации зданий и сооружений были реализованы кафедрой «Строительные конструкции» ПГУПС в 2020 году при разработке «Инструкции по безопасной эксплуатации оснований и строительных конструкций объектов инфраструктуры Петербургского метрополитена» (далее — Инструкция), которая является основополагающим документом ГУП «Петербургский метрополитен» для эксплуатирующих служб данной организации и применяется для

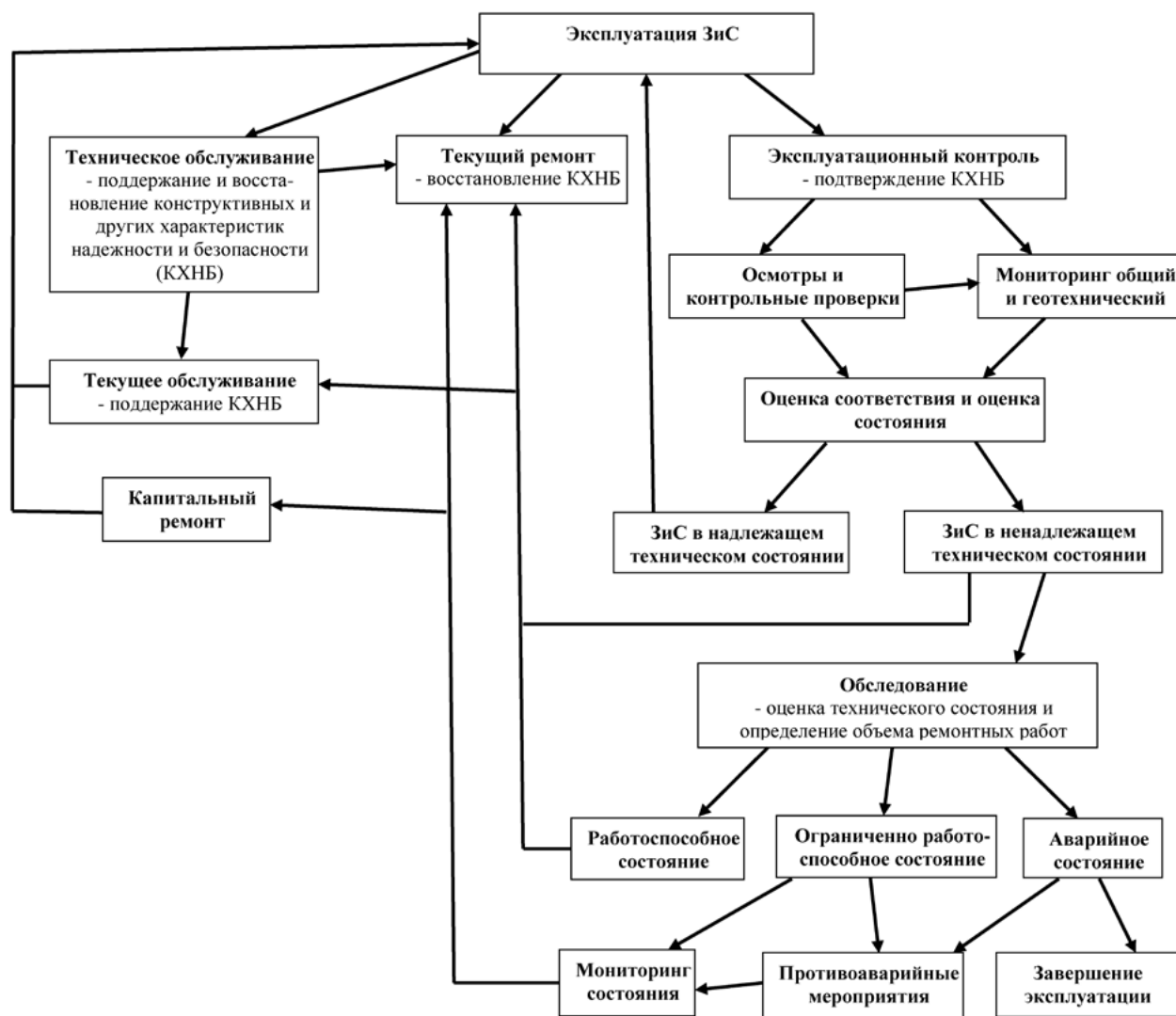


Рис. 1. Принципиальная схема эксплуатации объектов (зданий и сооружений)

всех тоннельных сооружений, вестибюлей, различных административных и промышленных зданий и сооружений.

Подтверждение ХНИБ грунтового основания и строительных конструкций объекта в соответствии с разработанной Инструкцией выполняется с целью контроля технического состояния несущих и ограждающих конструкций в виде эксплуатационного контроля, который обязательно включает в себя контрольные проверки, осмотры и, при необходимости, мониторинг.

Техническое состояние строительных конструкций и грунтового основания здания, соору-

жения первично оценивается владельцем объекта и считается надлежащим [8], если ХНИБ соответствуют требованиям действующих нормативов и всех разделов проектной документации, а именно — в части геометрических размеров объекта, в части физическо-механических характеристик материалов грунтового основания и строительных конструкций, фактических нагрузок, при этом выявленные отступления от требований проекта в виде повреждений не нарушают требования норм и работоспособность объекта.

Поддержание ХНИБ объекта в соответствии с разработанной Инструкцией осуществляется

Состав обслуживания эксплуатируемого объекта (здания, сооружения) в зависимости от состояния строительных конструкций

| Техсостояние объекта                       | Описание параметров техсостояния                                                                                                                                                                                                     | Рекомендации эксплуатации                                                                                          | Требования контроля                                                                                | Ремонтные работы                                          |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Нормативное (надлежащее)                   | Дефектов и повреждений, влияющих на снижение несущей способности и эксплуатационной пригодности объекта, не имеется                                                                                                                  | Эксплуатация объекта без ограничений                                                                               | Контрольные проверки, периодические осмотры                                                        | Техническое обслуживание                                  |
| Работоспособное (надлежащее)               | Параметры объекта не отвечают требованиям проекта, норм и стандартов, но имеющиеся нарушения не приводят к нарушению работоспособности, и несущая способность конструкций, с учетом имеющихся дефектов и повреждений, обеспечивается | Эксплуатация объекта без ограничений и ремонтное обслуживание                                                      | Контрольные проверки, периодические осмотры                                                        | Техническое обслуживание или текущий ремонт               |
| Ограниченно работоспособное (ненадлежащее) | Дефекты и повреждения, приведшие к некоторому снижению несущей способности имеются, но опасность внезапного разрушения отсутствует и функционирование конструкции возможно при контроле ее состояния и условий эксплуатации          | Эксплуатация при ограничении нагрузок и воздействий, проведение мониторинга и обследования, ремонтное обслуживание | Определяется приказом по иному порядку эксплуатации с учетом результатов мониторинга, обследования | Техническое обслуживание или текущий ремонт или капремонт |
| Аварийное (ненадлежащее)                   | Повреждения и деформации, свидетельствующие об исчерпании несущей способности и опасности обрушения, имеются                                                                                                                         | Завершение эксплуатации. Проведение противоаварийных мероприятий, ремонтное обслуживание                           | Эксплуатационный контроль не производится                                                          | Незамедлительный демонтаж и капремонт или реконструкция   |

силами владельца посредством технического обслуживания. Если выявлено отступление от надлежащего состояния строительных конструкций или грунтового основания эксплуатируемого здания, сооружения, тогда требуется восстановление конструктивных характеристик надежности и безопасности объекта посредством технического обслуживания, текущего ремонта, а, при необходимости, капитального ремонта или реконструкции с уточнением технического состояния объекта с помощью обследования силами специализированной организации.

Частота и полнота технического обслуживания эксплуатируемого объекта определяются категорией технического состояния строительных конструкций [11]. Предлагаемый состав обслуживания эксплуатируемого объекта в соответствии с разработанной Инструкцией в зависимости от состояния строительных конструкций приведен в таблице.

Эксплуатационный контроль технического состояния эксплуатируемого объекта в соответствии с разработанной Инструкцией, в том числе на транспорте, должен осуществляться посредством периодических осмотров, контрольных проверок и, при необходимости мониторинга с целью оценки состояния конструктивных характеристик надежности и безопасности, а также их соответствия требованиям норм и проектной документации [8]. При эксплуатационном контроле объекта должны быть решены следующие задачи: контроль систем пожарной безопасности, санитарного состояния всех помещений и пространств объекта, выполнение проектных рекомендаций охраны окружающей среды, состояния здания, сооружения в целом, его несущих, ограждающих элементов в эксплуатационной документации, в том числе в информационной модели для объектов, запроектированных по технологии информационного моделирования (ТИМ), выяв-



ление, устранение повреждений грунтового основания и строительных конструкций, проектирование мероприятий по техобслуживанию здания, сооружения, планирование сроков обследования здания, сооружения, проектирование плановых работ по текущему ремонту.

Периодические осмотры грунтового основания и строительных конструкций эксплуатируемого объекта в соответствии с разработанной Инструкцией должны выполняться собственными силами владельца в виде: ежедневных или еженедельных осмотров, а также сезонных и внеочередных.

Ежедневные осмотры должны выполняться только для объектов класса КС-3 [9, 10], т. е. для особо ответственных объектов, в том числе транспортной инфраструктуры в виде периодических осмотров основных строительных конструкций (определяется проектной документацией и владельцем объекта). Еженедельные осмотры должны выполняться для объектов классов КС-1, КС-2 [8, 9] в виде периодических осмотров основных строительных конструкций (определяется проектной документацией и владельцем объекта).

Сезонные осмотры рекомендуется производить для всех объектов в виде осмотров грунтового основания по периметру объекта и строительных конструкций 2 раза в год — весной и осенью [9]. Весенний осмотр следует выполнять в целях выявления появившихся за зимний период повреждений самого объекта и элементов благоустройства по периметру объекта. Осенний осмотр объекта следует предусматривать до начала отопительного сезона для проверки готовности здания, сооружения к эксплуатации в зимних условиях.

Внеочередные осмотры эксплуатируемого объекта выполняются при необходимости по требованиям норм после явлений стихийного характера (ощутимых землетрясений, больших снего-

падов, подтоплений и наводнений, проливных дождей, ураганных ветров), аварий систем инженерного и технологического оборудования и при обнаружении просадок или деформаций грунтового основания (не позднее двух дней после бедствия или аварии), а также при обнаружении существенных повреждений строительных конструкций, которые могут влиять на работоспособность, надежность объекта и его механическую безопасность и для устранения которых недостаточно только выполнения технического обслуживания или текущего ремонта.

Контрольные проверки здания, сооружения в соответствии с разработанной Инструкцией должны выполняться параллельно с периодическими осмотрами для фиксации отклонений ХНБ в виде дефектов и повреждений несущих и ограждающих конструкций, в том числе инструментально: рулетками, штангенциркулями, трещиномерами, дефектоскопами, микроскопами, теодолитами, тахеометрами или другими приборами и инструментами.

Как показывает практический опыт, контрольные проверки и осмотры строительных конструкций зданий и сооружений, осуществляемые силами владельца объекта, не всегда достаточно качественны и своевременны, что связано с нечеткими указаниями по объемам обследований в проектной документации, отсутствием, как правило, квалифицированных специалистов в штате владельца, необходимого специального оборудования для измерений и полноценного доступа к несущим строительным конструкциям объекта (наличие подвесных потолков, навесных фасадов, отделочных панелей, отсутствие технологических мостиков, лестниц и прочих элементов для обеспечения доступа к несущим конструкциям).

Мониторинг эксплуатируемого объекта в соответствии с разработанной Инструкцией осуществляется только специализированными организациями при появлении какой-либо проблемы

или возможной угрозы, а также при выполнении ремонтных работ (реконструкции или капитального ремонта объекта). Различают мониторинг общий для контроля технического состояния эксплуатируемого объекта и геотехнический мониторинг грунтового основания и фундаментов объекта или окружающей застройки [11, 12]. Мониторинг может быть использован как интерактивный процесс не только для контроля за состоянием объекта, но и как профилактическое средство, позволяющее своевременно обнаружить и диагностировать негативные тенденции [13], например для особо ответственных объектов или их частей (объектов транспортной инфраструктуры).

Для полноценной и качественной оценки технического состояния эксплуатируемого объекта, особенно транспортной инфраструктуры, требуется проведение обследования грунтового основания и строительных конструкций объекта специализированными организациями. Сроки обследования объекта в течение его эксплуатации могут соответствовать требованиям нормативных документов [11, 12] на добровольной основе, а именно — раз в 10 лет для объектов класса КС-2 и раз в 5 лет для объектов класса КС-3 (если сроки не определены проектной документацией). Обследование объекта является обязательным: при изменении назначения объекта, по предписанию уполномоченных на ведение государственного строительного надзора органов, по окончании нормативных сроков эксплуатации объекта, по результатам последствий огневых воздействий, различных стихийных бедствий и аварий, связанных с разрушением строительных конструкций эксплуатируемого объекта, а также при обнаружении значительных дефектов, повреждений и деформаций в процессе технического обслуживания здания, сооружения.

Полнота и состав проведения мониторинга и обследования эксплуатируемого объекта опреде-

ляется в соответствии с требованиями нормативов [11, 12].

Техническое обслуживание строительных конструкций здания, сооружения в соответствии с разработанной Инструкцией выполняется силами собственника с целью предупреждения возникновения и развития значительных повреждений в несущих и ограждающих элементах и представляет собой комплекс ремонтных и профилактических мероприятий. Работы по техническому обслуживанию эксплуатируемого объекта в общем случае, как правило, включают: уборку всех помещений объекта, расчистку снега на территории, устранение несущественных повреждений несущих и ограждающих конструкций, обнаруженных в ходе любых осмотров и проверок, контроль систем мониторинга техсостояния, работы строительных конструкций и грунтов, а также проведение работ по подготовке объекта к сезонной эксплуатации [10].

Ремонтное обслуживание эксплуатируемого объекта может осуществляться при необходимости в виде текущих и капитальных ремонтов.

Текущий ремонт, как правило, проектируется по итогам эксплуатационного контроля строительных конструкций здания, сооружения и может включать:

- частичную замену на небольшой площади ограждающих элементов строительных конструкций, ремонт отделки и прочие работы, не требующие выполнения проектной документации;
- ликвидацию незначительных дефектов и повреждений несущих и ограждающих строительных конструкций.

Возможные сроки проведения и перечень работ по текущему ремонту элементов строительных конструкций здания представлены в нормах [14]. Как показывает практический опыт, в большинстве случаев текущие ремонты зданий и сооружений выполняются несвоевременно, что приводит к развитию значительных дефектов и

повреждений и, как следствие, к необходимости капитального ремонта.

Капитальный ремонт эксплуатируемого объекта (плановый или внеплановый) представляет собой восстановление работоспособности и надежности здания, сооружения с заменой (при необходимости) отдельных элементов, систем инженерного оборудования, а также восстановление или улучшение эксплуатационных показателей. Первый капитальный ремонт предусматривается с учетом проектной долговечности объекта [9] или степени физического износа его строительных конструкций и оборудования, второй капитальный ремонт выполняется в случае изменения условий эксплуатации, появления аварийных или чрезвычайных ситуаций, развития значительного физического износа несущих и ограждающих конструкций здания, сооружения до окончания нормативных сроков эксплуатации объекта. Рекомендуемая частота проведения капитальных ремонтов приведена в нормативах [14]. Сроки, методы и полнота проведения капитального ремонта объекта должны уточняться с учетом специфики здания, сооружения, условий его эксплуатации (климатических условий, эксплуатационных нагрузок, материалов строительных конструкций и прочих факторов) [15].

Как показывает опыт обследований ряда объектов, в том числе на транспорте, отступление от требований нормативно-правовых актов и проектной документации при проектировании, строительстве и эксплуатации приводит зачастую к возникновению существенных дефектов и повреждений строительных конструкций, а иногда к возникновению разрушений и аварий [3–7].

Одним из перспективных путей повышения уровня безопасности на транспорте является внедрение системы управления техническим состоянием объектов [16], в том числе использование ТИМ и организация мониторинга строительных конструкций [17] особо ответственных зданий и сооружений.

## Заключение

Организация безопасной эксплуатации объектов на транспорте — комплексная задача, выполняемая на всех этапах жизненного цикла здания, сооружения (проектирование, строительство, эксплуатация). Работоспособность и механическая безопасность зданий и сооружений зависят от качества проектирования и наличия полноценного раздела в проекте по эксплуатации объекта, соответствия строительно-монтажных работ проектной документации, периодичности, полноты и качества эксплуатационного контроля, наличия квалифицированных специалистов по оценке технического состояния и наличия соответствующего современного оборудования, качества технического обслуживания и текущих ремонтов эксплуатируемого объекта. Действующие нормативно-правовые акты по организации строительства и эксплуатации любых объектов, в том числе на транспорте, несовершенны и требуют доработки в части детальных практических рекомендаций или полноценных ссылок на все нормативные документы, а также уточнения и развития действующей терминологии. Для особо ответственных объектов, в том числе на транспорте, необходима разработка собственных инструкций и рекомендаций по обеспечению безопасной и качественной эксплуатации. Кроме того, внедрение технологий информационного моделирования с организацией мониторинга строительных конструкций должно повысить качество проектирования, строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры. Пример разработки «Инструкции по безопасной эксплуатации оснований и строительных конструкций объектов инфраструктуры Петербургского метрополитена» выявил все несовершенства действующего законодательства, работы эксплуатирующих служб и позволил создать более полноценный документ по эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры метрополитена.

**Библиографический список**

1. Федеральный закон 30 ноября 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
  2. Улицкий В. М. Успешное строительство высокоскоростных магистралей: геотехническая составляющая / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 2–3 (63–64). — С. 36–39.
  3. Веселов В. В. Проблемы расчетов строительных конструкций с применением программных комплексов / В. В. Веселов; под ред. А. В. Улыбина // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы X научно-практической конференции, 10–11 октября 2019 года. — СПб.: Политехн. ун-т, 2019. — С. 22–27.
  4. Белый Г. И. Обрушение покрытия спортивного зала школы в Мурино / Г. И. Белый, В. В. Егоров, В. В. Веселов // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VIII Международной научно-практической конференции. — СПб.: ПГПУ, 2018. — С. 22–30.
  5. Веселов В. В. Эксплуатационная надежность железобетонных каркасов зданий по серии ИИ-04 / В. В. Веселов // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VII Международной научно-практической конференции. — СПб.: ПГПУ, 2017. — С. 82–87.
  6. Веселов В. В. Анализ обрушения каркаса при демонтаже покрытия спортивно-концертного комплекса «Петербургский» / В. В. Веселов; под ред. А. В. Улыбина // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы XI научно-практической конференции, 18–19 ноября 2021 года. — СПб.: Политехн. ун-т, 2021. — С. 5–13.
  7. Веселов В. В. Эксплуатационная надежность пролетных строений мостов и пути ее повышения / В. В. Веселов, А. М. Федоров // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VIII Международной научно-практической конференции. — СПб.: ПГПУ, 2018. — С. 41–51.
  8. Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации».
  9. ГОСТ 27751—2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
  10. СП 255.1325800.2016. Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения.
  11. ГОСТ 31937—2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
  12. СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве.
  13. Шашкин А. Г. Основы мониторинга механической безопасности сооружения при строительстве и эксплуатации / А. Г. Шашкин, В. М. Улицкий // Промышленное и гражданское строительство. — 2017. — № 12. — С. 6–14.
  14. МДС 13-14.2000. Положение о проведении планово-предупредительного ремонта.
  15. Веселов В. В. Современные методы проектирования реконструкции и усиления зданий и сооружений: учеб. пособие / В. В. Веселов, П. С. Сидорова. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. — 61 с.
  16. Кисилева О. Г. Управление техническим состоянием объектов железнодорожного транспорта / О. Г. Кисилева, Ж. Ж. Альтаева, А. Д. Кунебаев и др. // Актуальные научные исследования в современном мире. — 2021. — Вып. 2(70). — Ч. 2. — С. 100–104.
  17. Белый А. А. Проектирование и организация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодородных магистралях / А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев и др. // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2017. — Т. 14. — Вып. 2. — С. 211–222.
- Дата поступления: 23.01.2023  
Решение о публикации: 13.02.2023
- Контактная информация:**  
ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — канд. техн. наук, доц.; veselov.1977@inbox.ru

## Safe Operation of Buildings and Constructions on Transport

V. V. Veselov

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

**For citation:** Veselov V. V. Safe Operation of Buildings and Constructions on Transport // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 161–171. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171

### Summary

**Purpose:** To analyze the organization of safe operation of transport infrastructure facilities, their maintenance, routine repairs and working control in terms of building constructions. To establish the imperfections of regulatory documents for building and structure projection, construction and exploitation, to develop recommendations on quality improvement for facility safe operation organization. **Methods:** Analysis of regulatory documents (State Standards, Codes of Rules, Technical Regulations, Federal Laws, etc.), the results of technical inspection of constructional structures of buildings and facilities, the quality assessment of construction and exploitation of facilities including transport infrastructural ones. **Results:** Overview and analysis of the organization of safe operation of transport infrastructure facilities on all stages of lifecycle are given. The reliability and operability of constructional structures of buildings and facilities on transport depends on projection quality and the presence in specified documentation of full value section on facility exploitation, compliance of construction-installation works with specified documentation, timeliness, the presence there of the completeness and quality of working control, maintenance and routine repairs of a facility. Acting regulatory documents require particular practical recommendations or references on terminology regulations, additions and clarifications. The specificities of maintenance, routine repair and working control for constructional structures of buildings and facilities, the issues of their conformity and condition assessment as well as of reliability support in accordance with acting legislation are considered. **Practical significance:** “Instructions for Safe Exploitation of Foundations and Constructional Structures of Infrastructural Objects of St. Petersburg Subway” has been developed which has been introduced into the practical activities of Tunnel Construction Service for State Unitary Enterprise “St. Petersburg Subway”, imperfections of regulatory documents at projection, construction and exploitation stage have been identified, recommendations on improving the quality to organize safe exploitation of buildings and constructions during the development of regulatory documents have been proposed.

**Keywords:** Transport infrastructure, buildings, structures, constructional facilities, safe exploitation, maintenance, routine repair, exploitational control, inspection, monitoring.

### References

1. *Federal'nyy zakon 30 noyabrya 2009 g. № 384-FZ “Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy”* [Federal Law of November 30, 2009 № 384-FZ “Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures”]. (In Russian)
2. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G. Uspeshnoe stroitel'stvo vysokoskorostnykh magistralei: geotekhnicheskaya sostavlyayushchaya [Successful construction of high-speed highways: geotechnical component]. *Transport Rossiyskoy*

*Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2016, Iss. 2–3 (63–64), pp. 36–39. (In Russian)

3. Veselov V. V. *Problemy raschetov stroitel'nykh konstruktсий s primeneniem programmnykh kompleksov; pod red. A. V. Ulybina. Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy X nauchno-prakticheskoy konferentsii, 10–11 oktyabrya 2019 goda* [Problems of calculations of building structures using software complexes; edited by A. V. Ulybin. Survey of buildings and structures: problems and ways to solve them:

materials of the X scientific and practical conference. October 10–11, 2019]. St. Petersburg: Politekh. un-t Publ., 2019, pp. 22–27. (In Russian)

4. Belyy G. I., Egorov V. V., Veselov V. V. *Obrushenie pokrytiya sportivnogo zala shkoly v Murino. Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The collapse of the coating of the sports hall of the school in Murino. Inspection of buildings and structures: problems and ways to solve them: materials of the VIII International scientific and practical conference]. St. Petersburg: PGPU Publ., 2018, pp. 22–30. (In Russian)

5. Veselov V. V. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' zhelezobetonnykh karkasov zdaniy po serii II-04. Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Operational reliability of reinforced concrete frames of buildings according to the II-04 series. Inspection of buildings and structures: problems and ways to solve them: materials of the VII International scientific and practical conference]. St. Petersburg: PGPU Publ., 2017, pp. 82–87. (In Russian)

6. Veselov V. V. *Analiz obrusheniya karkasa pri demontazhe pokrytiya sportivno-kontsertnogo kompleksa "Peterburgskiy"; pod red. A. V. Ulybina. Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy XI nauchno-prakticheskoy konferentsii, 18–19 noyabrya 2021 goda* [Analysis of the collapse of the frame during the dismantling of the coating of the sports and concert complex "Petersburg"; ed. A. V. Ulybina. Inspection of buildings and structures: problems and ways to solve them: materials of the XI scientific and practical conference, November 18–19, 2021]. St. Petersburg: Politekh. un-t Publ., 2021, pp. 5–13. (In Russian)

7. Veselov V. V., Fedorov A. M. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' proletnykh stroeniy mostov i puti ee povysheniya. Obsledovanie zdaniy i sooruzheniy: problemy i puti ikh resheniya: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Operational reliability of span structures of bridges and ways to improve it. Inspection of buildings and structures: problems and ways to solve them:

materials of the VIII International scientific and practical conference]. St. Petersburg: PGPU Publ., 2018, pp. 41–51. (In Russian)

8. *Federal'nyy zakon ot 29 dekabrya 2004 g. № 190-FZ "Gradostroitel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law of December 29, 2004 № 190-FZ "Urban Planning Code of the Russian Federation"]. (In Russian)

9. *GOST 27751—2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsey i osnovaniy. Osnovnye polozheniya* [GOST 27751—2014. Reliability of building structures and foundations. Key points]. (In Russian)

10. *SP 255.1325800.2016. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila ekspluatatsii. Osnovnye polozheniya* [SP 255.1325800.2016. Buildings and constructions. Operating rules. Key points]. (In Russian)

11. *GOST 31937—2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya* [GOST 31937—2011. Buildings and constructions. Rules for inspection and monitoring of technical condition]. (In Russian)

12. *SP 305.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila provedeniya geotekhnicheskogo monitoringa pri stroitel'stve* [SP 305.1325800.2017. Buildings and constructions. Rules for conducting geotechnical monitoring during construction]. (In Russian)

13. Shashkin A. G., Ulitskiy V. M. *Osnovy monitoringa mekhanicheskoy bezopasnosti sooruzhenie pri stroitel'stve i ekspluatatsii* [Fundamentals of monitoring mechanical safety construction during construction and operation]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2017, Iss. 12, pp. 6–14. (In Russian)

14. *MDS 13-14.2000. Polozhenie o provedenii planovopredupreditel'nogo remonta* [MDS 13-14.2000. Regulations on scheduled preventive maintenance]. (In Russian)

15. Veselov V. V., Sidorova P. S. *Sovremennyye metody proektirovaniya rekonstruktsii i usileniya zdaniy i sooruzheniy: ucheb. posobie* [Modern methods of designing reconstruction and reinforcement of buildings and structures: textbook. manual]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2019, 61 p. (In Russian)

16. Kisileva O. G., Al'taeva Zh. Zh., Kunebaev A. D. et al. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta [Management of the technical condition of railway transport facilities]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennoy mire* [Actual scientific research in the modern world]. 2021, Iss. 2(70), part 2, pp. 100–104. (In Russian)

17. Belyy A. A., Baranovskiy A. A., Vorob'ev D. E. et al. Proektirovanie i organizatsiya sistemy monitoringa mostovykh sooruzheniy na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh [Design and organization of the monitoring system of bridge structures on high-speed railway highways].

*Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 211–222. (In Russian)

Received: January 23, 2023

Accepted: February 13, 2023

**Author's information:**

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering,  
Associate Professor; veselov.1977@inbox.ru

УДК 656.224

## Создание автоматизированной программы по расчету значений целевых показателей для выполнения графика движения

В. И. Ульяницкая<sup>1,2</sup>, Е. М. Иванова<sup>1</sup>, Д. Ю. Исакова<sup>1</sup>, А. М. Кишикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 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 ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 195112, Санкт-Петербург, Заневский пр., 73

**Для цитирования:** Ульяницкая В. И., Иванова Е. М., Исакова Д. Ю., Кишикова А. М. Создание автоматизированной программы по расчету значений целевых показателей для выполнения графика движения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 172–181. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-172-181

### Аннотация

**Цель:** Достижение автономности расчетов целевых показателей для выполнения графика движения пассажирских и пригородных поездов и принятия решений и оперативного руководства на основе полученных расчетов. Написание программы «Расчет значений целевых показателей для выполнения графика движения» обусловлено необходимостью повышения качества исполнения процесса и получения максимальной эффективности системы планирования и управления в целом. **Методы:** Использован язык программирования Pascal для автоматизации расчета целевых показателей. **Результаты:** Создание и написание самостоятельного программного продукта, с сохранением организационных и математических методов работы с информацией для принятия управленческих решений. **Практическая значимость:** Автоматизированный расчет целевых показателей для выполнения графика движения пассажирских и пригородных поездов позволит всем участникам пассажирского комплекса рассмотреть автоматизацию группы процессов, связанных со сбором и обработкой информации о выполнении процесса «Выполнение графика движения поездов», через единое окно. Предложенный программный продукт может быть рекомендован к практическому использованию в пассажирском комплексе ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** Автоматизация, язык программирования Pascal, обслуживание пассажиров, график движения, целевые показатели, пассажирский комплекс, каналы коммуникации, технические средства.

### Введение

Актуальность работы затрагивает важный аспект пассажирского комплекса — универсальность расчетов и принцип комплексной системы обработки данных. Статистические исследования пассажирских перевозок, накопление и учет данных, расчет целевых показателей через автоматизацию расчетов позволят контролировать изменение ситуации пассажирского движения в режиме реального времени, отслеживать выпол-

нение графика движения поездов в пределах установленного или заданного периода, за который будет формироваться отчет (месяц, квартал, год). Основная идея применения, автоматизация расчета опережающих «индексов» (целевых значений) — для обеспечения выполнения к завершению отчетного периода успешного выхода на запланированный уровень расчетных показателей, а в случае недостижения или невыполнения своевременно предпринять меры коррекции



(если такие возможны) или использовать превентивные меры управления на опережение (предупреждающие или корректирующие действия) [1].

Также особую важность имеет учет рисков невыполнения показателя, так как железнодорожный транспорт является объектом стратегического назначения, и при «выбросах» графика (в случаях сбоев в работе технических средств, ЧС, задержек поездов по причине пассажиров и пр.) требуется корректировка на общий показатель [2]. Как инструмент автоматизация расчета показателей позволит построить риск-ориентированную систему при реализации стратегии постоянного улучшения качества сервисных услуг в ОАО «РЖД» и обеспечит соблюдение не только графика движения поездов, но и рост потребительского отклика в виде обратной связи «пассажир — компания» [3].

### **Общие принципы перехода на автоматизацию расчетов**

Работа пассажирского комплекса направлена на обеспечение комплексного обслуживания и функционирования всех сегментов организации пассажирского движения. Основными целевыми показателями работы является выполнение 100 % графика движения пассажирских поездов (или «оптимального» соблюдения графика) [4], а также организация работы с обращениями пассажиров, а именно через уровень удовлетворенности пассажиров качеством услуг железнодорожного транспорта, где соблюдение расписания движения поездов и продолжительность поездки один из параметров оценки [5].

Статистика и учет на железнодорожном транспорте является основным инструментом планирования, управления и оперативного вмешательства на всех ступенях иерархии управления перевозочным процессом. Так, статистика отражает динамику изучаемых процессов и явлений через статистический показатель, характеризующий цифровое

значение того или иного действия. В свою очередь, они (показатели) формируют группу статистических данных, которая отражает совокупность закономерностей (внутренних и внешних).

Долгое время громадные потоки информации обрабатывались вручную, в условиях устойчивого развития транспортной отрасли на базе систем искусственного интеллекта [6] значительная часть операций постепенно стала переходить в человеко-машинные системы. Такой подход позволил в первую очередь уйти от трудоемких ручных расчетов (процессов) к обработке, учету и введению информации посредством машин и программ [7, 8]. При работе с исходными данными основными элементами механизации и автоматизации вычислительных работ служат программные продукты для расчета и анализа значений из объема перерабатываемой информации, тогда как при ручных расчетах решения «задач» и получения итоговых значений «завязаны» на работниках, выполняющих эти функции (рис. 1).

Последовательность основных ручных и автоматических операций процесса по расчету типовых данных указана в приведенной схеме.

Необходимость пересмотра функций планирования и управления, а также темпы технического развития приобретают определенный подход к трудоемким расчетам и обработки первичных потоков информации, что приводит к широкому применению программных продуктов [9].

### **Разработка программного продукта**

Для решения данной задачи мы выбрали универсальную программу на языке программирования Паскаль (PascalABC.NET), пригодную для данных вычислений и более понятную с точки зрения внутренней среды. Возможности среды PascalABC.NET, в отличие от других сред, максимально облегчены с точки зрения функционала и рассчитаны от программирования учебного к программированию визуальному и объектно-ориентированному [10].

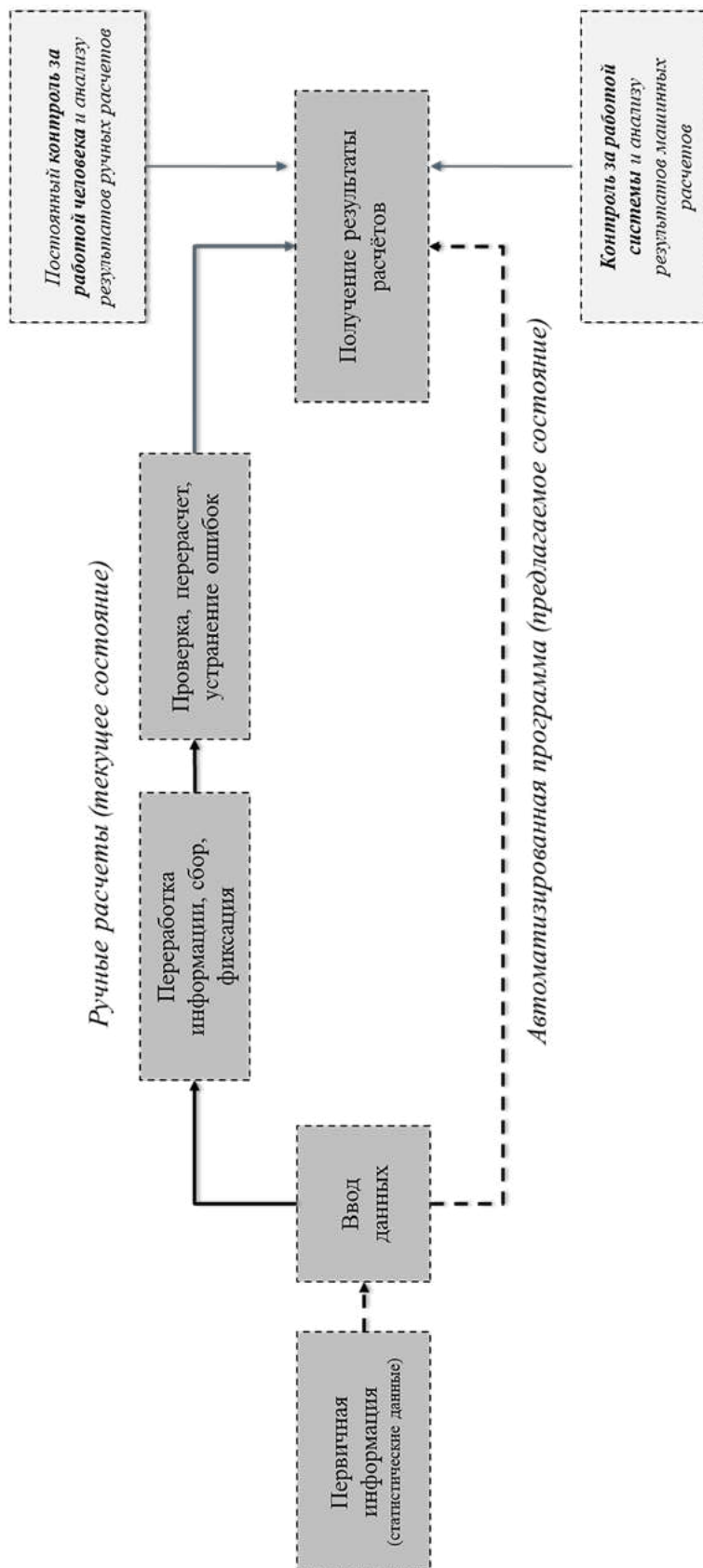


Рис. 1. Общая блок-схема эффективности автоматизации расчетов

```

program metodika;
var GDP, F, Z, Kizm, Ftek, Fpr3, Fpr, GDPpr, Ftsel, Ztsel, Dteki, Zteki, Ztek,
    Ztseli, Ftseli, GDPtseli, Ztekk, Dtekk, Ztselk: real;

begin
write ('      Расчёт целевых показателей для графика движения пассажирских
поездов по прибытию на станции посадки/высадки пассажиров в пути
следования поезда,');
writeln ('для ГД пригородных поездов по прибытию пригородных поездов на
пункты назначения и общим характеристикам');
writeln ('осуществляется следующим образом:');
writeln ('%ГДП = (Ф-З)/Ф*100%');
writeln ('      Введите значение Ф - фактов прибытия в пункты
посадки/высадки пассажиров дальних поездов/факты прибытия пригородных
поездов на станции назначения за исследуемый период текущего года и
аналогичный период прошлого года:');
readln (F);

```

Рис. 2. Исходный код программного продукта на языке программирования Pascal

Язык программирования PascalABC.NET — мощный современный язык, где главная отличительная черта программного продукта (системы) — это легкость ее модификации и адаптация к конкретным задачам пользователя.

Одной из основных форм многообразия задач PascalABC.NET можно отметить возможность выбора конкретного направления или парадигмы либо в достаточно произвольной форме использовать в программе комплексный подход (множество парадигм), получая при этом качественный и наглядный программный код (рис. 2) с минимальными затратами труда [11].

В основе исходных данных для программы лежит действующая методика расчета целевых показателей выполнения графика движения пассажирских и пригородных поездов [1], которая учитывает следующие параметры, использующиеся для оценки выполнения графика движения пассажирских и пригородных поездов:

1) выполнение по железной дороге показателей графика движения пассажирских и пригородных поездов не ниже уровня прошлого года;

2) выполнение по железной дороге показателей графика движения пассажирских и пригородных поездов не ниже уровня целевого параметра, устанавливаемого ОАО «РЖД» для участия железных дорог в отраслевом соревновании [12].

Основной задачей автоматизации данной методики является достоверная и объективная оценка работы территориальных управлений и железных дорог, а именно пассажирского комплекса, за счет оптимизации процесса распределения и урегулирования значений фактических и целевых показателей графика движения пассажирских поездов.

В программе, согласно условиям методики, присутствуют постоянные и расчетные величины, значения которых автоматически рассчитываются программой. Так, процент графика движения поездов (% ГДП) программа рассчитывает по формуле на основе вводимых исходных данных. При этом для легкости последовательности действий в интерфейсе программы были введены пояснительные абзацы и даны сноски на дополнительную информацию.

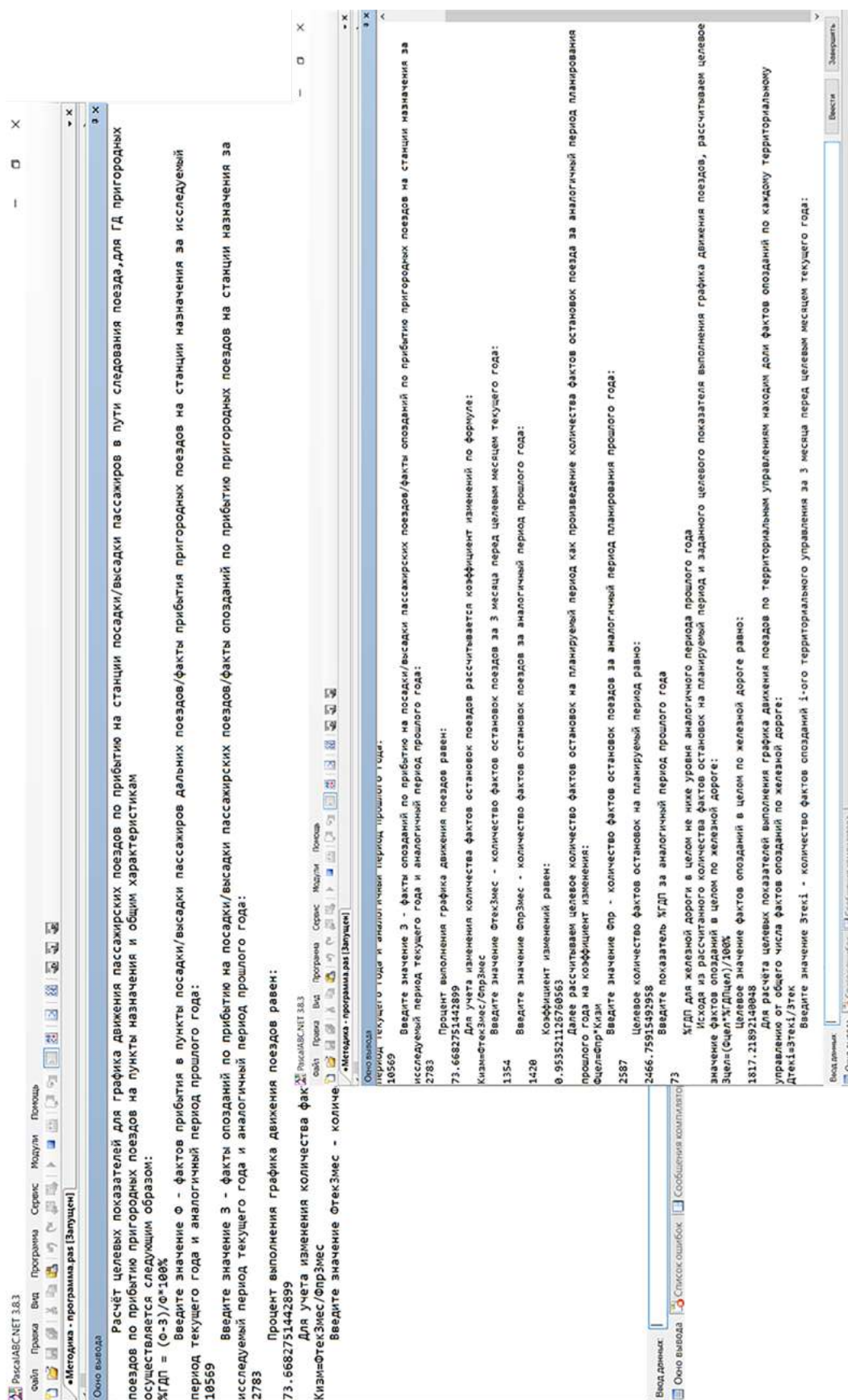


Рис. 3. Основные компоненты, используемые при работе программы

Выполненные с использованием программы расчеты показали, что:

- организованная на принципах автоматизированных расчетах система управления резко снижает обрабатываемый ручным способом поток информации и более точна в действиях;
- повышается эффективность планирования и качества работы за счет возрастания интеграции отдельных или смежных функций автоматизации производственных процессов;
- обеспечена возможность расширения параллельного выполнения задач и создания единого окна диагностики контроля массивом информации и оперативного реагирования на «выбросы»;
- ожидается минимизация, а в дальнейшем и исключение человеческого фактора как основного «индикатора» ошибок, когда сообщение об ошибке будет фиксировать программа и об этом сигнализировать пользователю;
- обеспечивается сохранение информации о состоянии последних данных и расчетах при аварийном прекращении системы аппаратно-программного комплекса;
- не меняя состав функций управления принятия решений, основанных на расчетах, обеспечивается применение оперативного вмешательства (меры коррекции) не только к устранению несоответствий, но и последствиям данных несоответствий (предупреждающие и корректирующие действия) [13, 14].

## Заключение

При переходе от ручного управления, в том числе и расчетов целевых показателей, компания ОАО «РЖД» учитывает принцип специализации, принцип пропорциональности, принцип непрерывности и т. д. [15]. Именно поэтому основной концепт данного научного исследования — это внедрить программу для автоматизации расчета значений целевых показателей для выполнения графика движения и, как следствие, направить

управленческие решения на недопущение или предотвращение возникновения неблагоприятного (кризисного, аварийного) состояния пассажирским комплексом [16, 17].

Автоматизированный расчет целевых показателей для выполнения графика движения пассажирских и пригородных поездов позволит участникам инновационного проекта стать частью введения новшества на рынок автоматизации группы процессов, связанных со сбором и обработкой информации о выполнении процесса «Выполнение графика движения поездов» [18–21].

## Благодарности

*Работа выполнена при поддержке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (далее — ФГБОУ ВО ПГУПС) инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами. Работа выполнялась в рамках Конкурса грантов на проведение студенческими научными коллективами (СНК) научных исследований и поддержана грантом от ФГБОУ ВО ПГУПС от 7 ноября 2022 года №610/р.*

*Авторы выражают особую благодарность Т. М. Шманёву, канд. техн. наук, доц., за предоставление методики расчета целевых показателей выполнения графика движения пассажирских и пригородных поездов, которая была взята в качестве исходных данных для написания программного продукта на языке программирования Pascal.*

*Авторы выражают признательность О. Д. Покровской, д-ру техн. наук, доц., заведующей кафедрой «Управление эксплуатационной работой» ФГБОУ ВО ПГУПС, за оказанную помощь при планировании и проведении исследования.*

**Библиографический список**

1. Шманёв Т. М. Метод повышения стабильности соблюдения графика движения пассажирских поездов: дисс. ... канд. техн. наук / Т. М. Шманёв. — СПб., 2019. — 28 с.
2. Максимова Е. С. Развитие теории управления рисками // Е. С. Максимова, В. Н. Шмаль // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2022. — Т. 16. — № 2. — С. 39–46. — DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-39-46.
3. Ульяницкая В. И. Совершенствование процесса работы с обращениями граждан путем автоматизации вспомогательных процессов в пассажирском комплексе / В. И. Ульяницкая; под ред. А. Ю. Паныхева, Т. С. Титовой, О. Д. Покровской; отв. за выпуск А. В. Сугоровский, Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева и др. // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2022): сборник трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 марта 2022 года. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. — С. 353–359.
4. Левин Д. Ю. График движения поездов: монография. В 2 частях. Ч. 2 / Д. Ю. Левин. — М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 634 с. — DOI: <https://doi.org/10.23682/122508>.
5. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2021 г. № 3041/р «Об утверждении Единой методики оценки уровня удовлетворенности пассажиров качеством услуг железнодорожного транспорта». — М.: ОАО «РЖД», 2021.
6. Чеченова Л. М. Устойчивое развитие транспортной отрасли на базе систем искусственного интеллекта / Л. М. Чеченова // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 4. — С. 125–138. — DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-125-138.
7. Бердышева Ю. А. Инструменты реализации цифровой трансформации железнодорожного транспорта // Ю. А. Бердышева, Е. А. Жаркова // Вестник СГУПС: гуманитарные исследования. — 2022. — № 1(12). — С. 5–8. — DOI: 10.52170/2618-7949\_2022\_12\_5.
8. Веригина А. В. Цифровая трансформация и пути ее реализации в ОАО «РЖД» // А. В. Веригина, А. Н. Никифорова // Теория и практика общественного развития. — 2022. — № 10(176). — С. 85–90. — DOI: 10.24158/tipor.2022.10.11.
9. Ткаченко А. Л. Применение программных продуктов в сфере бизнес аналитики // А. Л. Ткаченко, В. И. Кузнецова, Г. В. Заплатин // Информационные технологии. Проблемы и решения. — 2021. — № 3(16). — С. 26–32.
10. Осипов А. В. PascalABC.NET: Введение в современное программирование / А. В. Осипов. — Ростов-на-Дону, 2019. — 572 с.
11. Долинер Л. И. Основы программирования в среде PascalABC.NET: учебное пособие / Л. И. Долинер. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 128 с.
12. Котенко А. Г. Вопросы повышения стабильности выполнения графика движения поездов / А. Г. Котенко, А. А. Грачев, А. В. Гоголева и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2018. — № 1. — С. 59–70.
13. Safiullin R. Method to evaluate performance of measurement equipment in automated vehicle traffic control systems / R. Safiullin, V. Fedotov, A. Marusin // Transportation Research Procedia. — 2020. — Vol. 50. — Pp. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.003>.
14. Покровская О. Д. Логистические накопительно-распределительные центры как основа терминальной сети региона: монография / О. Д. Покровская. — Новосибирск, 2012. — 184 с.
15. Гершанок А. А. Цифровизация бизнес-процессов: ключевые проблемы и ошибки внедрения / А. А. Гершанок // Экономика и бизнес: теория и практика. — 2022. — № 8(90). — С. 86–91. — DOI: 10.24412/2411-0450-2022-8-86-91.
16. Abdukodirov S. The influence of freight train delays on the speed of trains at railway stations / S. Abdukodirov, D. Butunov, M. Ahmedova // Universum: технические науки. — 2022. — Iss. 9-5(102). — Pp. 50–53.
17. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 80–94. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94.
18. Едронова В. Н. Система индикаторов цифровой трансформации Российской Федерации / В. Н. Едронова // Экономический анализ: теория и практика. — 2021. — Т. 20. — № 6(513). — С. 1085–1103. — DOI: 10.24891/ea.20.6.1085.

19. Дроздова М. А. Цифровизация отрасли железнодорожных перевозок: проблемы и успехи / М. А. Дроздова, Е. А. Фурсова // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. — 2021. — С. 119–121.

20. Макаров И. С. Интеллектуальная система оперативной корректировки графика движения поездов / И. С. Макаров, Р. А. Горбачев, М. В. Фомин и др. // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 5. — С. 22–25.

21. Жаров В. С. Формирование стратегии технологической модернизации производственных предприятий / В. С. Жаров // Друкеровский вестник. — 2021. — № 1(39). — С. 129–137. — DOI: 10.17213/2312-6469-2021-1-129-137.

Дата поступления: 16.01.2023

Решение о публикации: 13.02.2023

#### Контактная информация:

УЛЬЯНИЦКАЯ Виктория Игоревна — аспирант;  
ulyanitskaya\_viktoriya@mail.ru

ИВАНОВА Елизавета Максимовна — студент;  
elizavetaiva@bk.ru

ИСАКОВА Дарья Юрьевна — студент;  
89500079894@bk.ru

КИШИКОВА Александра Михайловна — студент;  
k\_s\_m00@mail.ru

## Creation of Automated Program for Calculating the Values of Target Indicators for Traffic Schedule Implementation

V. I. Ulyanitskaya<sup>1,2</sup>, E. M. Ivanova<sup>1</sup>, D. Yu. Isakova<sup>1</sup>, A. M. Kishikova<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Regional Center for Information and Reference Support of Clients of North-Western Regional Directorate of Railway Stations — Structural Subdivision of Directorate of Railway Stations — Branch of Open Joint Stock Company “Russian Railways”, 73, Zanevsky pr., Saint Petersburg, 195112, Russian Federation

**For citation:** Ulyanitskaya V. I., Ivanova E. M., Isakova D. Yu., Kishikova A. M. Creation of Automated Program for Calculating the Values of Target Indicators for Traffic Schedule Implementation // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 172–181. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-172-181

### Summary

**Purpose:** Achievement of the autonomy of calculations of target indicators for the implementation of passenger and suburb train schedule, decision-making and operational management, based on obtained calculations. Writing the program “Calculation of Target Indicator Values for Traffic Schedule Implementation” is due to the need to improve process implementation quality and to obtain maximal efficiency of planning and management system in a whole. **Methods:** Pascal programming language was used to automate the calculation of target indicators. **Results:** Creation and writing of independent software product with the preservation of organizational and mathematical methods of the work with information for to make managerial decisions. **Practical significance:** Automated calculation of target indicators for passenger and suburb train traffic schedule implementation will allow passenger complex all participants to consider the automation of the group of the processes related to information collection and processing on the process implementation “Train Traffic Schedule Implementation” through a single window. The proposed software product can be recommended for practical usage in the passenger complex of JSC “Russian Railways”.

**Keywords:** Automation, Pascal programming language, passenger service, traffic schedule, target indicators, passenger complex, communication channels, technical means.



## References

1. Shmanev T. M. *Metod povysheniya stabil'nosti soblyudeniya grafika dvizheniya passazhirskikh poezdov: disc. ... kand. tekhn. nauk* [Method of increasing the stability of compliance with the schedule of passenger trains: dIss. ... cand. tech. sciences]. St. Petersburg, 2019, 28 p. (In Russian)
2. Maksimova E. S., Shmal' V. N. Razvitie teorii upravleniya riskami [Development of risk management theory]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm: Telecommunications and transport]. 2022, vol. 16, Iss. 2, pp. 39–46. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-39-46. (In Russian)
3. Ul'yanitskaya V. I., pod red. A. Yu. Panycheva, T. S. Titovoy, O. D. Pokrovskoy; otv. za vypusk A. V. Sugo-rovskiy, G. I. Nikiforova, T. G. Sergeeva et al. *Sovershenst-vovanie protsessa raboty s obrashcheniyami grazhdan putem avtomatizatsii vspomogatel'nykh protsessov v passazhirskom komplekse. Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy na transporte (UERT-2022): sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 15–16 marta 2022 goda* [Improving the process of working with citizens' appeals by automating auxiliary processes in the passenger complex. Management of operational work in transport (UERT-2022): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 15–16 March, 2022]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2022, pp. 353–359. (In Russian)
4. Levin D. Yu. *Grafik dvizheniya poezdov: monografiya. V 2 chastyakh. Ch. 2* [Train schedule: monograph. In 2 parts. Part 2]. Moscow: Ay Pi Ar Media Publ., 2022, 634 p. DOI: <https://doi.org/10.23682/122508>. (In Russian)
5. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 29 dekabrya 2021 g. № 3041/r "Ob utverzhdenii Edinoi metodiki otsenki urovnya udovletvorennosti passazhirov kachestvom uslug zheleznodorozhnogo transporta"* [Decree of Russian Railways dated December 29, 2021 № 3041/r "On Approval of the Unified Methodology for Assessing the Level of Passenger Satisfaction with the Quality of Railway Transport Services"]. Moscow: OAO "RZhD" Publ., 2021. (In Russian)
6. Chechenova L. M. Ustoychivoe razvitie transportnoy otrasli na baze sistem iskusstvennogo intellekta [Sustainable development of the transport industry based on artificial intelligence systems]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2021, Iss. 4, pp. 125–138. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-4-125-138. (In Russian)
7. Berdysheva Yu. A., Zharkova E. A. Instrumenty realizatsii tsifrovoy transformatsii zheleznodorozhnogo transporta [Instruments for the implementation of the digital transformation of railway transport]. *Vestnik SGUPS: gumanitarnye issledovaniya* [Vestnik SGUPS: humanitarian research]. 2022, Iss. 1(12), pp. 5–8. DOI: 10.52170/2618-7949\_2022\_12\_5. (In Russian)
8. Verigina A. V., Nikiforova A. N. Tsifrovaya transformatsiya i puti ee realizatsii v OAO "RZhD" [Digital transformation and ways of its implementation in Russian Railways]. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya* [Theory and practice of social development]. 2022, Iss. 10(176), pp. 85–90. DOI: 10.24158/tipor.2022.10.11. (In Russian)
9. Tkachenko A. L., Kuznetsova V. I., Zaplatin G. V. Primenenie programmnykh produktov v sfere biznes analitiki [Application of software products in the field of business analytics]. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya* [Information technologies. Problems and solutions]. 2021, Iss. 3(16), pp. 26–32. (In Russian)
10. Osipov A. V. *PascalABC.NET: Vvedenie v sovremennoe programmirovaniye* [PascalABC.NET: Introduction to modern programming]. Rostov-na-Donu, 2019, 572 p. (In Russian)
11. Doliner L. I. *Osnovy programmirovaniya v srede PascalABC.NET: uchebnoe posobie* [Fundamentals of programming in the PascalABC.NET environment: tutorial]. Ekaterinburg: Ural. un-t Publ., 2014. 128 p. (In Russian)
12. Kotenko A. G., Grachev A. A., Gogoleva A. V. et al. Voprosy povysheniya stabil'nosti vypolneniya grafika dvizheniya poezdov [Issues of improving the stability of the execution of the train schedule]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2018, Iss. 1, pp. 59–70. (In Russian)
13. Safiullin R., Fedotov V., Marusin A. Method to evaluate performance of measurement equipment in automated vehicle traffic control systems. Transportation



Research Procedia, 2020, vol. 50, pp. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.003>.

14. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskie nakopitel'no-raspredeitel'nye tsentry kak osnova terminal'noy seti regiona: monografiya* [Logistics storage and distribution centers as the basis of the region's terminal network: monograph]. Novosibirsk, 2012, 184 p. (In Russian)

15. Gershanok A. A. Tsifrovizatsiya biznes-protsessov: klyuchevye problemy i oshibki vnedreniya [Digitalization of business processes: key problems and implementation errors]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika* [Economics and business: theory and practice]. 2022, Iss. 8(90), pp. 86–91. DOI: 10.24412/2411-0450-2022-8-86-91. (In Russian)

16. Abdukodirov S., Butunov D., Ahmedova M. The influence of freight train delays on the speed of trains at railway stations. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022, Iss. 9-5(102), pp. 50–53.

17. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistics transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94. (In Russian)

18. Edronova V. N. Sistema indikatorov tsifrovoy transformatsii Rossiyskoy Federatsii [The system of indicators of digital transformation of the Russian Federation]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* [Economic analysis: theory and practice]. 2021, vol. 20, Iss. 6(513), pp. 1085–1103. DOI: 10.24891/ea.20.6.1085. (In Russian)

19. Drozdova M. A., Fursova E. A. *Tsifrovizatsiya otrasli zheleznodorozhnykh perevozok: problemy i uspekhi*.

*III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [Digitalization of the railway transportation industry: problems and successes. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings.]. 2021, pp. 119–121. (In Russian)

20. Makarov I. S., Gorbachev R. A., Fomin M. V. et al. Intel'lektual'naya sistema operativnoy korrektsirovki grafika dvizheniya poezdov [Intelligent system for operational adjustment of the train schedule]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Zheleznodorozhny transport]. 2021, Iss. 5, pp. 22–25. (In Russian)

21. Zharov V. S. Formirovanie strategii tekhnologicheskoy modernizatsii proizvodstvennykh predpriyatiy [Formation of a strategy for the technological modernization of manufacturing enterprises]. *Drukerovskiy vestnik* [Drucker Bulletin]. 2021, Iss. 1(39), pp. 129–137. DOI: 10.17213/2312-6469-2021-1-129-137. (In Russian)

Received: January 16, 2023

Accepted: February 13, 2023

#### Author's information:

Victoria I. ULYANITSKAYA — Postgraduate Student;  
[ulyanickaya\\_viktoriya@mail.ru](mailto:ulyanickaya_viktoriya@mail.ru)

Elizaveta M. IVANOVA — Student;  
[elizavetaiva@bk.ru](mailto:elizavetaiva@bk.ru)

Darya Yu. ISAKOVA — Student;  
[89500079894@bk.ru](mailto:89500079894@bk.ru)

Alexandra M. KISHIKOVA — Student;  
[k\\_s\\_m00@mail.ru](mailto:k_s_m00@mail.ru)

УДК 656.073:656.078.12

## Онтологический подход к разработке единой базы знаний мультимодальных перевозок

А. П. Бадецкий, О. А. Медведь

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

**Для цитирования:** Бадецкий А. П., Медведь О. А. Онтологический подход к разработке единой базы знаний мультимодальных перевозок // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 182–193. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-182-193

### Аннотация

**Цель:** В рамках проводимой цифровой трансформации транспортного комплекса в целом и железнодорожного транспорта в частности дать краткую аналитическую характеристику создаваемых цифровых платформ и сервисов. Рассмотреть перспективные технологии, находящиеся либо на стадии запуска, либо на пути к пику завышенных ожиданий согласно циклу технологического хайпа исследовательской компании Gartner. Привести пример единой базы знаний как основы цифровой платформы мультимодальных перевозок. **Методы:** Применялись методы визуального структурирования информации, в частности ментальные карты (интеллект-карты). Для представления онтологии предметной области использовалась семантическая сеть как метод представления знаний. **Результаты:** Проведенный анализ разрабатываемых и существующих цифровых платформ и сервисов показал, что в их основе, помимо данных, должны лежать более сложные информационные единицы — активные знания. Для этого необходим метод интеграции данных из разрозненных источников, их интеграции и циркуляции как внутри одной отрасли, так и между различными отраслями с целью генерации и распространения знаний. С учетом специфики работы различных видов транспорта, участвующих в мультимодальных перевозках, для этого должна быть выбрана предметная область, объединяющая все виды транспорта. Обосновано применение предметной области «перевозка груза», в силу чего на железнодорожном транспорте необходимо создание системы управления грузопотоками. Разработан фрагмент онтологии, описывающей домен «перевозка грузов» для железнодорожного транспорта. **Практическая значимость:** Показана необходимость применения активных знаний для создания автономных интеллектуальных производств на транспорте. Использование баз знаний на основе онтологий позволит повысить уровень взаимодействия различных видов транспорта в «узких» местах при перевалке груза, а также расширить спектр предоставляемых клиентам услуг.

**Ключевые слова:** Мультимодальные перевозки, базы знаний, онтологии, управление грузопотоками, цифровая трансформация.

### Введение

Происходящие в настоящее время процессы цифровизации всех отраслей промышленности и производства являются прямым следствием развития существующих и появления новых технологических трендов в рамках четвертой про-

мышленной революции, или Индустрии 4.0. Так, например, исследовательская компания Gartner в 2022 году выделила три основных направления перспективных технологий, которые могут начать массово внедряться в технологические процессы компаний в период от 2 до 10 лет и будут иметь

трансформационные последствия для компаний и организаций\*:

1. Развитие и расширение иммерсивного опыта. Ключевой технологией данного направления является цифровой двойник клиента (digital twin of the customer), позволяющий на основе виртуального динамического представления клиента прогнозировать его поведение с целью улучшения качества его обслуживания и предложения ему новых продуктов и услуг.

2. Ускоренная автоматизация на базе искусственного интеллекта. Основной в этой группе технологий являются автономные системы — самоуправляемые физические или программные агенты для решения задач в определенной предметной области, обладающие автономией, способностью к обучению и свободой действий.

3. Оптимизированная доставка технологий. В этой области инновации концентрируются вокруг основных составляющих цифрового бизнеса — сообществ разработчиков продуктов, решений или услуг и используемых ими платформах.

Технологии, образующие ядро данных трендов, определены в национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации» [1] — основном документе, определяющем направление развития нашей страны в реалиях шестого технологического уклада. Также она является базой для разработки программ цифровизации как транспортной отрасли в целом, так и каждого вида транспорта в отдельности. Рассмотрим результаты реализации данных стратегий более подробно.

## 1. Базы знаний как основа цифровых платформ

Стратегия цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации [2] направлена на повышение уровня конкуренто-

способности транспортных услуг, обеспечение их доступности, безопасности, экологичности и качества для населения и бизнеса. Достижение поставленных задач должно достигаться в рамках шести укрупненных направлений развития транспортного комплекса. В рамках данной статьи можно отдельно выделить направление «Бесшовная грузовая логистика», как непосредственно отвечающее за национальный логистический контур.

Для железнодорожного транспорта результатом перехода к цифровым технологиям будет являться создание набора платформ, разделенного по следующим трем направлениям внутренней цифровизации компании:

1. Предоставления услуг, включающее в себя платформы:

- мультимодальных пассажирских перевозок;
- мультимодальных грузовых перевозок;
- логистического оператора электронной коммерции.

2. Операционной деятельности, объединяющего платформы:

- транспортно-логистических узлов;
- оператора линейной инфраструктуры;
- управления движением.

3. Корпоративного управления, базирующегося на платформе непроизводственных процессов.

Для авторов в рамках данной статьи наибольший интерес представляет платформа мультимодальных грузовых перевозок в силу следующего ряда причин:

1. Железнодорожный транспорт был и остается основным видом транспорта, осуществляющим перевозки в российской части международных коридоров, особенно в текущих условиях «разворота на Восток».

2. Перевалка грузов на другой вид транспорта является, как правило, узким местом логистической цепи, поэтому правильная организация работы в таких пунктах, с учетом возможностей

\* Цикл «хайпа» компании Gartner. — URL: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2022-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies>.

всех видов транспорта, имеет первостепенное значение.

3. Существует конкурентное давление со стороны железнодорожного транспорта других стран, предлагающего альтернативные маршруты перевозки грузов, пусть даже эти решения не всегда являются рациональными [3].

4. Мультимодальные перевозки являются составной частью глобальных логистических цепей перевозок грузов, и принятие решений по их организации должно приносить максимальный эффект не только для ОАО «РЖД», но и для всех участников логистической цепи.

5. В свете цифровизации транспортного комплекса произойдет интеграция транспортных систем отдельных видов транспорта в единую «бесшовную» систему [4, 5], и железнодорожный транспорт претендует на ведущую роль в ней.

Важной особенностью цифровой трансформации является объединение всех существующих и вновь создаваемых продуктов, услуг и решений на базе единой «метаплатформы», что будет способствовать повышению транспарентности и качества транспортных процессов, упрощению документооборота и ускорению обмена информацией между участниками мультимодальной перевозки. Между всеми платформами наблюдается синергетический эффект на трех уровнях: внутри одного вида транспорта, между видами транспорта и на уровне транспортного комплекса в целом. В некотором смысле это важный шаг к созданию систем, которые в терминах Индустрии 4.0 называются автономными интеллектуальными («умными») производствами, или киберфизическими системами [6].

Создание таких систем затрудняется колоссальным объемом информации, которую необходимо интегрировать и согласовать в рамках единой цифровой платформы. Источники данных зачастую разрознены даже внутри одной компании [7], содержащиеся в них сведения могут быть дублирующими или разнородными, обладать

свойствами синонимии и меро-холонимии и т. д. При масштабировании задачи на уровень всего одной транспортной системы ее сложность возрастает экспоненциально, не говоря уже о транспортном комплексе в целом.

Выходом из этой ситуации часто считается организация платформы на основе блокчейн [8, 9]. При этом упускается из виду тот факт, что блокчейн является, по сути, базой данных, хоть и обладающей определенными конкурентными преимуществами (децентрализация, устойчивость к взлому, неизменяемость и прозрачность данных, ускорение транзакций и т. д.). Но в рамках автономных интеллектуальных производств наибольшей значимостью и финансовой отдачей обладают решения, управляемые знаниями (knowledge-driven application). Они обеспечивают анализ, интеллектуальный поиск и классификацию данных, их интеграцию, повторное использование и согласованное обращение внутри организации [10], что позволяет использовать данные компании в качестве активных знаний (active knowledge).

В сфере мультимодальных перевозок активные знания открывают значительные преимущества для всех ее участников — например, примененное кем-либо когда-либо удачное новаторское решение, ускорившее продвижение груза по логистической цепи или позволившее получить дополнительную прибыль (в рамках действующей законодательной базы), становится доступным для всех. А возможность генерации новых знаний может помочь отыскать такие решения даже в том случае, если их никто никогда не применял.

Основой таких решений, как правило, являются онтологии, хотя встречаются и фреймовые модели представления знаний. С точки зрения авторов статьи, онтологии представляются более естественными для человеческого восприятия структурами, нежели фреймы, и поэтому предлагаются в качестве семантической основы для формирования базы знаний мультимодальных перевозок.

## 2. Понятие онтологии и примеры их использования

В компьютерных науках онтология является способом формализации знаний некой предметной области и относится к визуальным методам структурирования знаний. В простейшем случае формальную модель онтологии можно представить в виде триплета «понятие — свойство понятия — связь между ними» [11] и описать выражением вида:

$$O = \langle C, P, R \rangle, \quad (1)$$

где  $C$  — множество понятий (классов) предметной области;

$P$  — множество свойств этих понятий (классов);

$R$  — множество связей между этими понятиями (классами).

Все множества являются конечными. В случаях, характерных для задач автоматизации цифровых производств и генерирования новых знаний, к стандартному триpletу добавляется множество аксиом [12], которое, в отличие от остальных множеств, является потенциально бесконечным. В этом случае модель онтологии может быть записана в виде:

$$O = \langle C, P, R, A \rangle, \quad (2)$$

где  $A$  — множество аксиом, которое может быть получено из понятий, их свойств и связей между ними.

Классификация онтологий проводится по 3 основным направлениям: по цели создания, степени формальности и по содержанию (рис. 1).



Рис. 1. Классификация онтологий

По цели создания выделяют четыре уровня онтологий:

- онтологии представления. Описывают область представления знаний и служат для создания языка спецификаций для онтологий более низких уровней;

- онтология верхнего уровня. Описывает абстрактные междисциплинарные понятия и отношения между ними, фиксирует знания, общие для нескольких предметных областей;

- онтология предметной области (онтология домена). Описывает и обобщает понятия в рамках одной предметной области;

- прикладная онтология. Описывает концептуальную модель конкретной задачи или приложения.

В рамках этого направления выделяют:

- формальные таксономии. Определяют отношение «класс — подкласс», при этом строго соблюдая транзитивность данного отношения;

- формальные экземпляры. Определяют отношение «класс — экземпляр», то есть добавляют к иерархии классов их экземпляры;

- свойства на основе фреймов. Каждый класс может также иметь слоты, содержащие информацию о его свойствах, при этом они могут наследоваться классами более высоких уровней;

- онтологии с ограничениями на область значений свойств. В отличие от предыдущего типа значения свойств выбираются из заранее определенного множества или подмножества понятий;

- дизъюнктивные классы, обратные свойства. Позволяют объявить два класса непересекающимися (не имеющими общих экземпляров), а также, кроме прямого вывода отношений, осуществлять и обратный вывод;

- произвольные логические ограничения. Позволяют определять произвольные аксиомы.

В рамках этой классификации онтологии разделяются на:

- общие онтологии. Описывают наиболее общие концепты, независимые от конкретной проблемы или области;

- онтологии задач. Отражают специфику конкретной прикладной задачи или программы;

- предметные онтологии. Описывают реальные предметы, использующиеся в какой-либо деятельности.

В настоящее время онтологии применяются как ОАО «РЖД» в рамках интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ) [13–15], так и на железных дорогах Европейского союза [16, 17]. Тем не менее анализ работ [13–17] показывает, что эти онтологии больше направлены на хранение и консолидацию данных о состоянии различных объектов перевозочного процесса, то есть согласно приведенной выше классификации являются либо предметными, либо прикладными.

Так, онтология ИСУЖТ содержит в себе, помимо прочего, сведения о текущей дислокации вагонов, их состоянии (груженный или порожний), времени до текущего отцепочного ремонта и т. д. Онтологии, применяемые на железных дорогах Европейского союза, содержат схожую информацию об объектах инфраструктуры и их текущем состоянии. Но при всех своих преимуществах они не включают в себя более абстрактный, технологический уровень знаний, который присутствует в онтологиях домена.

При этом можно отметить, что данная онтология будет являться, по сути, межпредметной — в перевозке участвуют различные виды транспорта, каждый со своей технологией и спецификой работы, нормативными документами, регламентами погрузочно-разгрузочных работ и т. д. В этом случае для внутренней непротиворечивости онтологии необходима единая «точка», вокруг которой их можно объединить. В качестве такой объединяющей «точки» можно выбрать груз, и тогда предметной областью будет являться «перевозка груза».

### 3. Требования к содержанию и функционалу онтологии домена «перевозка груза»

В практике железнодорожного транспорта сложилась ситуация, при которой, несмотря на то что его задачей является предоставление услуг по перевозке груза, эффективных технологических инструментов для управления именно потоками грузов не выработано до сих пор. Управление грузопотоками производится на основе деления грузов на три категории — высоко-, средне- и низкодходные. В зависимости от стоимости находящихся в них грузов, поезда в случае сбоев в работе и технологической несогласованности получают определенный приоритет в своем продвижении до пункта назначения. В связи с этим образуются заторы, что выражается в том числе и в росте количества отставленных от движения поездов.

Два главных логистических инструмента, имеющих в распоряжении ОАО «РЖД», — план формирования и график движения поездов — позволяют косвенно осуществлять управление грузопотоками путем функционального преобразования его сначала в вагоно-, а затем — в поездопоток [18, 19]. Управление грузами на основе подобного рода преобразования имеет ряд недостатков:

- в составе поезда могут перевозиться грузы различных отправителей;
- груз может перевозиться групповой, повагонной или мелкой отправкой;
- груз даже от одного отправителя может быть направлен в адрес разных получателей;
- даже один отправитель может отправить несколько видов груза в адрес одного или нескольких получателей.

Современные технологии позволяют разработать систему управления грузовыми отправками, даже несмотря на обширную номенклатуру перевозимых железнодорожным транспортом грузов [20–23]. Для мультимодальных перевозок такой подход является особенно актуальным, так как:

1. С технологической точки зрения мультимодальные перевозки являются наиболее сложным звеном перевозочного процесса, поскольку, кроме разных видов транспорта, в них участвуют еще и транспортные системы разных стран. В связи с этим возникают вопросы технологической сопряженности и унифицируемости этих систем, что, как отмечалось выше, чаще всего является «узким» местом перевозки.

2. Процесс перевозки груза является операционной частью цепей поставок, а в цепях поставок производится управление именно грузами, или товарами (принцип 7R).

При этом онтология «перевозка груза» как единая база знаний должна содержать в себе следующую информацию [24, 25]:

- о способах упаковки и перевозки каждого вида груза;
- о способах погрузки, выгрузки каждого вида груза, а также о погрузочно-разгрузочных машинах, предназначенных для работы с этим грузом;
- сведения о подвижном составе, предназначенном для перевозки каждого вида груза;
- о способах размещения и крепления груза в подвижном составе;
- о минимальных весовых нормах загрузки вагонов для каждого вида груза;
- об объектах терминально-складского комплекса, на которых производится погрузка/выгрузка и перегрузка заданного вида груза, возможности для кросс-докинга;
- о наличии и количестве погрузочно-разгрузочных машин на каждом складе, технологических нормах времени погрузки/выгрузки и перегрузки заданного вида груза.

Кроме того, такие же сведения должны содержаться и для подвижного состава и объектов инфраструктуры других видов транспорта. Пользователь при запросе «как можно перевести груз из точки А в точку Б?» должен получать

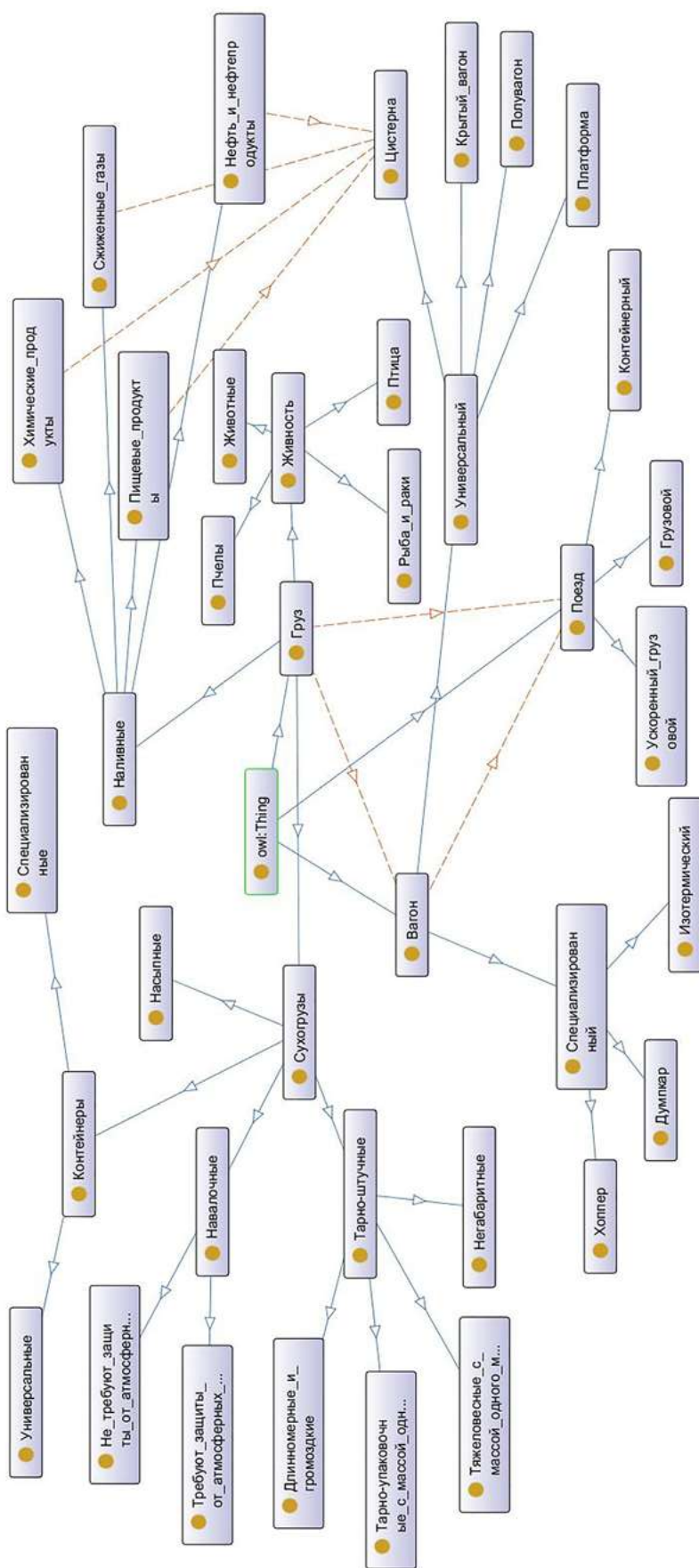


Рис. 2. Фрагмент онтологии предметной области «перевозка грузов»



развернутый ответ на свой вопрос вида: «Класс груза — допустимый подвижной состав для перевозки груза (минимальные весовые нормы, варианты упаковки груза в каждом виде подвижного состава, если груз возможно перевозить в нескольких видах подвижного состава, способы укладки груза в каждом из них) — технические средства погрузки-выгрузки (в зависимости от вида подвижного состава и упаковки, а также способ погрузки-выгрузки с нормативами времени на технологические операции) — перечень мест общего или необщего пользования, на которых производится погрузка-выгрузка данного вида груза с учетом заданных станций погрузки-выгрузки, техническая оснащенность этих мест». Также онтология должна иметь доступ к нормативно-справочной информации, чтобы клиенту (оператору перевозки, перевозчику, организатору перевозки и т. д.) по запросу выдавался перечень документов, на основе которых он получил данную рекомендацию.

На основе информации, размещенной в онтологии, должна быть возможность выстраивать логистические цепочки доставки грузов как во внутреннем, так и в межгосударственном сообщении, с возможностью ее перестройки в случае возникновения технологических сбоев или форс-мажорных обстоятельств. Например, если доставка груза в установленный срок железнодорожным транспортом невозможна из-за инфраструктурных ограничений, клиенту можно предложить доставку груза автомобильным транспортом с перевалкой груза на ближайшем терминале. Примерный фрагмент онтологии предметной области «перевозка грузов» для железнодорожного транспорта приведен на рис. 2.

## Заключение

Цифровизация транспортного комплекса в целом и отдельных видов транспорта требует комплексных решений из разных областей искус-

ственного интеллекта и компьютерных наук, которые смогли бы обеспечить их интеграцию в единую бесшовную систему с понятными и прозрачными принципами управления. Для мультимодальных перевозок такие решения особенно актуальны в свете технической и технологической разницы транспортных систем различных видов транспорта. Главную ценность в этих условиях приобретают знания и системы управления ими. В статье предложен класс решений для создания основы таких систем в условиях Индустрии 4.0, обеспечивающий не только прозрачность и доступность информации для всех участников перевозочного процесса, но и непрерывную циркуляцию и повторное ее использование в качестве активных знаний.

## Библиографический список

1. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р. — URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>.
2. Паспорт Стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации. — URL: <https://mintrans.gov.ru/activities/297/documents>.
3. Бадецкий А. П. Оптимизация распределения контейнеропотоков на направлении Китай — Европейский союз / А. П. Бадецкий, А. Н. Деревянко // *Russian Journal of Logistics & Transport Management* — 2020. — Т. 5. — № 1. — С. 69–86.
4. Лapidус Б. М. Гладкая бесшовная транспортная система как инструмент повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта / Б. М. Лapidус, Л. В. Лapidус // *Экономика железных дорог*. — 2016. — № 10. — С. 27–37.
5. Лapidус Б. М. Гладкая бесшовная транспортная система — инновационная модель будущего: природа, сущность, детерминанты качества / Б. М. Лapidус, Л. В. Лapidус // *Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика*. — 2017. — № 2. — С. 45–64.

6. Кобзев С. А. Бережливая киберфизическая производственная система транспортной компании / С. А. Кобзев // Железнодорожный транспорт. — 2020. — № 9. — С. 4–13.
7. Hubauer T. et al. Use Cases of the Industrial Knowledge Graph at Siemens / T. Hubauer et al. // International Semantic Web Conference (P & D/Industry/BlueSky). — 2018.
8. Перспективы использования технологии блокчейн в организации железнодорожных перевозок: информационно-аналитический обзор. — Eurasian Rail Alliance Index (ERAI). — 2018. — 23 с.
9. Сергеев В. И. Применение инновационной технологии «Блокчейн» в логистике и управлении цепями поставок / В. И. Сергеев, Д. И. Кокурин // Креативная экономика. — 2018. — Т. 12. — № 2 — С. 125–140.
10. Муромцев Д. И. Индустриальные графы знаний — интеллектуальное ядро цифровой экономики / Д. И. Муромцев, А. А. Романов, Д. Г. Волчек // Control Engineering Россия. — 2019. — № 5(83). — С. 32–39.
11. Berners-Lee T. The Semantic Web / T. Berners-Lee, J. Hendler, O. Lassila // Scientific American. — May 17, 2001.
12. Studer R., Benjamins R., Fensel D. Knowledge Engineering: Principles and Methods / R. Studer, R. Benjamins, D. Fensel // Data and Knowledge Engineering. — 1998. — Iss. 25(1-2). — Pp. 161–197.
13. Клепов А. В. Отраслевые модели онтологии ИСУЖТ / А. В. Клепов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2017): труды восьмой научно-технической конференции. — М.: НИИАС, 2017. — С. 43–45.
14. Клепов А. В. Онтология ИСУЖТ / А. В. Клепов, В. А. Броневицкий, Н. И. Капустин // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018): труды восьмой научно-технической конференции. — М.: НИИАС, 2018. — С. 16–20.
15. Матюхин В. Г. О текущем состоянии проекта ИСУЖТ и реализации технологии интервального регулирования на его платформе / В. Г. Матюхин, В. И. Уманский, А. Б. Шабунин // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): труды восьмой научно-технической конференции. — М.: НИИАС, 2019. — С. 3–7.
16. Лазуткина В. С. Онтологии больших данных, машинного обучения, и искусственного интеллекта на цифровой железной дороге / В. С. Лазуткина, А. А. Климов, В. П. Куприяновский и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Т. 7. — Вып. 5. — С. 75–88.
17. Климов А. А. BIM и инженерные формализованные онтологии на цифровой железной дороге Европы в объединении EULYNX — экономика данных / А. А. Климов, В. П. Куприяновский, А. В. Степаненко и др. // International Journal of Open Information Technologies. — 2018. — Т. 6. — Вып. 8. — С. 38–65.
18. Бадецкий А. П. Оптимизация скорости доставки грузов на основе управления адаптивным планом формирования поездов / А. П. Бадецкий // Железнодорожный транспорт. — 2017. — № 3. — С. 51–53.
19. Badetskii A. P. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work / A. P. Badetskii, O. A. Medved // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 May, 2020. — Novosibirsk, 2021. — Pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
20. Бадецкий А. П. Перспективные технологии адаптивного управления грузопотоками / А. П. Бадецкий // Логистика: современные тенденции развития: материалы XIX Международной научно-технической конференции. — СПб., 2020. — С. 39–44.
21. Осьминин А. Т. Научное решение проблем перевозочного процесса / А. Т. Осьминин // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 12. — С. 12–17.
22. Осьминин А. Т. Увеличение пропускных и провозных способностей за счет повышения эффективности перевозочного процесса и транспортного обслуживания / А. Т. Осьминин // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — 2018. — № 2. — С. 14–31.
23. Осьминин А. Т. Реинжиниринг модели управления перевозками / А. Т. Осьминин // РЖД-Партнер. — 2020. — № 1-2. — С. 46–49.

24. Бадецкий А. П. Применение методов искусственного интеллекта для управления грузопотоками в мультимодальном сообщении / А. П. Бадецкий // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — 2021. — № 1. — С. 38–46.

25. Бадецкий А. П. Управление в политранспортных системах на основе методов искусственного интеллекта / А. П. Бадецкий // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2021): труды четвертой Международной научно-практической конференции. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Ч. 1. — С. 3–12.

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 13.02.2023

**Контактная информация:**

БАДЕЦКИЙ Александр Петрович —

канд. техн. наук, доц.;

badetsklii@pgups.ru

МЕДВЕДЬ Оксана Анатольевна —

канд. техн. наук, доц.;

oa.medved@yandex.ru

## Ontological Approach to the Development of Unified Knowledge Base of Multimodal Transportations

A. P. Badetskii, O. A. Medved

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

**For citation:** Badetskii A. P., Medved O. A. Ontological Approach to the Development of Unified Knowledge Base of Multimodal Transportations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 182–193. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-182-193

### Summary

**Purpose:** In the frames of ongoing digital transformation of transport complex in a whole and railway transport in particular, to give brief analytical characterization of being developed digital platforms and services. To consider promising technologies that are either at launch stage or on the way to the peak of overpriced expectations as to technological hype cycle of Gartner Research Company. To give an example of unified knowledge base as a basis of digital platform for multimodal transportation. **Methods:** Methods for visual structuring of information were used, in particular, mental maps (intellect-maps). To represent subject area ontology, a semantic network was used as a method for knowledge representation. **Results:** The pursued analysis of being developed and existing digital platforms and services has shown that besides data, there should lie at their basis more complex informational units — an active knowledge. This requires the method of data integration from disparate sources, their integration and circulation as within one industry as well as between various industries in order of knowledge generation and spread. In view of work specifics of transport various kinds, participating in multimodal transportations, the subject area, uniting all kinds of transport, should be chosen for this. The application of “cargo transportation” subject area has been justified by virtue of which, it is necessary to create management system of cargo flows on railway transport. Ontology fragment, describing “cargo transportation” domain for railway transport, has been worked out. **Practical significance:** The necessity of applying active knowledge to create autonomous intellectual productions on transport is shown. The use of knowledge bases, established on ontologies, will allow to raise the level of interaction of transport various kinds in “narrow” places during cargo transshipment as well as to expand the range of services, provided to customers.

**Keywords:** Multimodal transportations, knowledge bases, ontologies, cargo traffic management, digital transformation

## References

1. *Programma "Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii"*, utverzhennaya rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 iyulya 2017 g. № 1632-r [Program "Digital Economy of the Russian Federation", approved by the order of the Government of the Russian Federation of July 28, 2017 № 1632-r]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>. (In Russian)
2. *Pasport Strategii cifrovoj transformacii transportnoj otrasli Rossijskoj Federacii* [Passport of the Digital Transformation Strategy of the transport industry of the Russian Federation]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/activities/297/documents>. (In Russian)
3. Badetskii A. P., Derevyanko A. N. Optimizaciya raspredeleniya kontejneropotov na napravlenii Kitaj — Evropejskij Soyuz [Optimization of the distribution of container flows on the China — European Union route]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management* [Russian Journal of Logistics & Transport Management]. 2020, vol. 5, Iss. 1, pp. 69–86. (In Russian)
4. Lapidus B. M., Lapidus L. V. Gladkaya besshovnaya transportnaya sistema kak instrument povysheniya konkurentosposobnosti zheleznodorozhnogo transporta [Smooth seamless transport system as a tool for increasing the competitiveness of railway transport]. *Ekonomika zheleznih dorog* [The economy of railways.]. 2016, Iss. 10, pp. 27–37. (In Russian)
5. Lapidus B. M., Lapidus L. V. Gladkaya besshovnaya transportnaya sistema — innovacionnaya model' budushchego: priroda, sushchnost', determinanty kachestva [A smooth seamless transport system is an innovative model of the future: nature, essence, determinants of quality]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6: Ekonomika* [Bulletin of the Moscow University. Series 6: Economics]. 2017, Iss. 2, pp. 45–64. (In Russian)
6. Kobzev S. A. Berezhlivaya kiberfizicheskaya proizvodstvennaya sistema transportnoj kompanii [Lean cyberphysical production system of a transport company]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway transport]. 2020, Iss. 9, pp. 4–13. (In Russian)
7. Hubauer T. et al. Use Cases of the Industrial Knowledge Graph at Siemens. International Semantic Web Conference (P & D/Industry/BlueSky), 2018.
8. *Perspektivy ispol'zovaniya tekhnologii blokchejn v organizacii zheleznodorozhnyh perevozok: informacionno-analiticheskij obzor* [Prospects for the use of blockchain technology in the organization of railway transportation: information and analytical review]. Eurasian Rail Alliance Index (ERAI), 2018, 23 p. (In Russian)
9. Sergeev V. I., Kokurin D. I. Primenenie innovacionnoj tekhnologii "Blokchejn" v logistike i upravlenii cepyami postavok [Application of innovative Blockchain technology in logistics and supply chain management]. *Kreativnaya ekonomika* [Creative economy]. 2018, vol. 12, Iss. 2, pp. 125–140. (In Russian)
10. Muromcev D. I., Romanov A. A., Volchek D. G. Industrial'nye grafy znaniy — intellektual'noe yadro cifrovoj ekonomiki [Industrial knowledge graphs — the intellectual core of the digital economy]. *Control Engineering Rossiya* [Control Engineering Russia]. 2019, Iss. 5(83), pp. 32–39. (In Russian)
11. Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O. The Semantic Web. Scientific American, May 17, 2001.
12. Studer R., Benjamins R., Fensel D. Knowledge Engineering: Principles and Methods. Data and Knowledge Engineering, 1998, Iss. 25(1-2), pp. 161–197.
13. Klepov A. V. Otrasyevye modeli ontologii ISUZhT. *Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2017): trudy vos'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Branch models of ontology ISUZhT. Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2017): proceedings of the eighth scientific and technical conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2017, pp. 43–45. (In Russian)
14. Klepov A. V., Bronevickij V. A., Kapustin N. I. *Ontologiya ISUZhT. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2018): trudy vos'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Ontology ISUZhT. Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2018): proceedings of the eighth scientific and technical conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2018, pp. 16–20. (In Russian)
15. Matyuhin V. G., Umanskij V. I., SHabunin A. B. *O tekushchem sostoyanii proekta ISUZhT i realizatsii tekhnologii interval'nogo regulirovaniya na ego platforme. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom*

*transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019): trudy vos'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [On the current state of the ISUZhT project and the implementation of interval control technology on its platform. Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019): proceedings of the eighth scientific and technical conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2019, pp. 3–7. (In Russian)

16. Lazutkina V. S., Klimov A. A., Kupriyanovskij V. P. et al. Ontologii bol'shih dannyh, mashinnogo obucheniya, i iskusstvennogo intellekta na cifrovoj zheleznoj doroge [Ontologies of big data, machine learning, and artificial intelligence on the digital railway]. *International Journal of Open Information Technologies* [International Journal of Open Information Technologies]. 2019, vol. 7, Iss. 5, pp. 75–88. (In Russian)

17. Klimov A. A., Kupriyanovskij V. P., Stepanenko A. V. et al. BIM i inzhenernye formalizovannye ontologii na cifrovoj zheleznoj doroge Evropy v ob"edinenii EULYNX — ekonomika dannyh [BIM and engineering formalized ontologies on the digital railway of Europe in the association EULYNX — Data Economy]. *International Journal of Open Information Technologies* [International Journal of Open Information Technologies]. 2018, vol. 6, Iss. 8, pp. 38–65. (In Russian)

18. Badetskii A. P. Optimizatsiya skorosti dostavki грузов na osnove upravleniya adaptivnym planom formirovaniya poezdov [Optimization of the speed of cargo delivery based on the management of an adaptive train formation plan]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2017, Iss. 3, pp. 51–53. (In Russian)

19. Badetskii A. P., Medved O. A. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work. *Transportation Research Procedia*, Novosibirsk, 2021, pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.

20. Badetskii A. P. *Perspektivnye tekhnologii adaptivnogo upravleniya Грузопотокami. Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya: materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Perspective technologies for adaptive control of cargo flows. Logistics: modern development trends: materials of the XIX International Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2020, pp. 39–44. (In Russian)

21. Os'minin A. T. Nauchnoe reshenie problem perevoznogo processa [Scientific solution of transportation process problems]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2018, Iss. 12, pp. 12–17. (In Russian)

22. Os'minin A. T. Uvelichenie propusknyh i provoznyh sposobnostej za schet povysheniya effektivnosti perevoznogo processa i transportnogo obsluzhivaniya [Increase in throughput and carrying capacity by increasing the efficiency of the transportation process and transport services]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZHD"* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"]. 2018, Iss. 2, pp. 14–31. (In Russian)

23. Os'minin A. T. Reinzhiniring modeli upravleniya perevozkami [Reengineering of the transportation management model]. *RZHD-Partner* [RZD-Partner]. 2020, Iss. 1-2, pp. 46–49. (In Russian)

24. Badetskii A. P. Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta dlya upravleniya Грузопотокami v mul'timodal'nom soobshchenii [Application of artificial intelligence methods for cargo traffic management in multimodal communication]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZHD"* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"]. 2021, Iss. 1, pp. 38–46. (In Russian)

25. Badetskii A. P. *Upravlenie v politransportnykh sistemakh na osnove metodov iskusstvennogo intellekta. Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (RILTTRANS-2021): trudy chetvertoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Management in polytransport systems based on artificial intelligence methods. Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (RILTTRANS-2021): proceedings of the fourth International scientific and practical conference]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 1, pp. 3–12. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 13, 2023

#### Author's information:

Aleksandr P. BADETSKII — PhD in Engineering, Associate Professor; badetskii@pgups.ru

Oksana A. MEDVED — PhD in Engineering, Associate Professor; oa.medved@yandex.ru

УДК 656.01: 338.47

## Совершенствование аналитического метода расчета наличной пропускной способности с применением имитационного моделирования

М. А. Марченко

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

**Для цитирования:** Марченко М. А. Совершенствование аналитического метода расчета наличной пропускной способности с применением имитационного моделирования // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 194–206. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-194-206

### Аннотация

**Цель:** Разработать способ расчета наличной пропускной способности на железнодорожной линии на основе совершенствования аналитических формул и применения инструментов имитационного моделирования. Корректировка математического аппарата и расчет коэффициента имитационного моделирования. **Методы:** Применялись аналитический метод, имитационного и динамического моделирования, математическое моделирование, инструментарий программного комплекса AnyLogic. **Результаты исследования:** Новый способ расчета, позволяющий повысить точность определения пропускной способности железнодорожной линии. В свою очередь, новый способ позволит оптимизировать эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут применяться при аналитике, прогнозировании и моделировании перевозочных процессов в диспетчерских центрах управления перевозками ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** Железнодорожная линия, наличная пропускная способность, расчетные формулы, имитационная модель, коэффициент имитационного моделирования.

Актуальность данной работы заключается в оптимизации используемых в настоящее время способов расчета наличной пропускной способности на основе аналитических расчетов путем построения имитационной модели в программном комплексе AnyLogic. В работе представлена абстрактная имитационная модель, эмпирическим образом корректирующая существующие формулы расчета наличной пропускной способности.

### 1. Анализ теоретического состояния вопроса

Подобная проблематика широко рассматривается в зарубежных изданиях. В работе под назва-

нием «Визуальное интерактивное моделирование и имитационное моделирование как поддержка принятия решений в логистических операциях железнодорожного транспорта» специалист в области железнодорожного высокоскоростного движения В. Черич [1] предложил новый способ расчета наличной пропускной способности, апробированный на существующем железнодорожном полигоне в Хорватии. Автор произвел построение имитационной модели, которая демонстрирует работу железнодорожной инфраструктуры по пропуску поездов, с помощью методики, основанной на использовании инструментов имитационного моделирования.

П. П. Бобрик в статье под названием «Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте» [2] произвел комплексный анализ поточности движения различных видов транспорта, в том числе и железнодорожного, по специализированным ниткам графика и скорости разрастания заторов в случае ее снижения. В работе автором предложен новый термин под названием «плотность потока». Автором выявлена и в полной мере описана аналитическая зависимость интенсивности увеличения транспортных заторов, приводящая к снижению эффективности перевозочного процесса и работы железнодорожного транспорта. Работа полезна для настоящего исследования подробным аналитическим описанием поставленных задач и наличием формул разрастания транспортных заторов.

В статье под названием «Особенности определения пропускной способности двухпутных участков» Ж. Я. Абдуллаевым рассмотрена проблема повышения эффективности расчета пропускной способности на железнодорожных линиях и ее дальнейшего повышения. Автором классифицированы все применяемые в настоящий момент методы определения пропускной способности железнодорожных линий, также произведен анализ и усовершенствование аналитических формул расчета наличной пропускной способности с учетом ограничений в виде отсутствия пересечения на графике грузового и высокоскоростного поезда во встречном движении. Научная новизна заключается в предложении автором нового способа прокладки ниток графика с целью увеличения пропускной способности без реконструкционных мероприятий. Недостатком работы является отсутствие исследований с применением инструментов имитационного моделирования, что не позволяет наглядно продемонстрировать движение поездов [3].

Работы по расчету пропускной способности железнодорожных магистралей представлены

в работах [4–8], а также в иностранных литературных источниках [9–15] и в нормативном документе [16].

Следует отметить, что в литературных источниках [17–21] отражена проблематика алгоритмизации и нормирования работы транспортных систем, однако отсутствуют иллюстрации практического применения предложений. В работах [22–24] разработан инструментарий комплексной оценки транспортно-логистических систем, однако в подтверждение верифицируемости предложений не приводится оценка моделирования в реальных условиях. Учитывая перенастройку и переориентацию транспортных потоков [25–28], а также сложности ситуационного управления перевозочным процессом [29–33] в волатильной экономике [34], можно констатировать необходимость гибкого, адаптивного управления процессами перевозок для повышения точности определения пропускной способности железнодорожных линий. Это позволит оптимизировать эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

## 2. Имитационное моделирование движения поездов по железнодорожной линии

Для вычисления данных наличной пропускной способности железнодорожных линий применяют общеизвестную формулу (1) [16]:

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}})}{I_p} \cdot \alpha_n, \quad (1)$$

где  $t_{\text{техн}}$  — бюджет времени на содержание и ремонт инфраструктуры;

$I_p$  — расчетный межпоездный интервал;

$\alpha_n$  — коэффициент надежности работы инфраструктуры и подвижного состава, принимаем равным 0,96 [16].

Межпоездной интервал, являющийся одним из переменных множителей формулы (1), вычисляют по формуле (2):

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{ср} \cdot 16,7} + t_v, \quad (2)$$

где  $L_{п1}$ ,  $L_{п2}$  — длина соответственно впереди и позади идущего поезда;

$L_v$  — расстояние которое проходит второй поезд за время, необходимое для восприятия машинистом сигнала ближнего светофора;

$L_{бл1}$ ,  $L_{бл2}$  — длина соответственно первого и второго по счету блок-участков относительно впереди идущего поезда;

$V_{ср}$  — средняя скорость следования поездов по блок-участкам;

$t_v$  — время на восприятие изменения показания светофора, принимаем равным 0,05 мин [16].

Вышеприведенную аналитическую формулу предлагается усовершенствовать путем введения предложенного в работе коэффициента имитационного моделирования, который был предложен в данной работе. Его расчет выполняется посредством имитационного моделирования движения поездов по железнодорожной линии с различными скоростями.

Коэффициент имитационного моделирования — это поправочный коэффициент, определяемый экспериментальным путем с помощью имитационного моделирования и вводимый в аналитические формулы расчета.

Межпоездной интервал рассчитываем относительно поезда, время хода которого по участку минимально, в данном случае относительно скоростного.

Построим имитационную модель, симулирующую движение поездов по абстрактной железнодорожной линии, длина которой составляет 1 км. Имитационная модель симулирует движе-

ние двух поездов: скоростного и пассажирского со скоростями соответственно 5 и 2 м/с. Сбор аналитических данных в виде времени их следования от начальной до конечной точки маршрута следования поездов будет осуществляться в гистограмме. Параметры подобраны с точки зрения оптимальной демонстрации влияния разгона и замедления на значение наличной пропускной способности железнодорожной линии. Являются условными величинами, прямо пропорциональными реальным значениям скоростей поездов и представленными в таком виде для удобства демонстрации имитационной модели и способа получения результатов.

Демонстрационная железнодорожная линия состоит из двух железнодорожных путей, по одному из которых осуществляет движение скоростной поезд, а по второму следует пассажирский. Точки зарождения и погашения поездопотоков находятся соответственно в начальной и конечной части железнодорожного пути и не совпадают с крайними точками железнодорожного пути в целях предотвращения программной ошибки в связи с выходом габаритов подвижного состава за габариты пути. На рис. 1 приведена вышеописанная железнодорожная линия.

Поездопотоки появляются в начальной точке движения при помощи блока `trainSource`, после чего поезд следует согласно задаваемым параметрам в блоке `trainMoveTo` до указанной в этом же блоке точки на железнодорожном пути. В конце блочной части модели находится блок `trainDispose`. В имитационной модели также находится блок библиотеки моделирования процессов под названием `timeMeasureStart`, фиксирующий время начала движения поезда из начальной точки, а также блок `timeMeasureEnd`, определяющий момент времени прохода поезда через конечную точку. Информация о времени следования обоих поездов отображается в виде гистограммы. По оси  $x$  отображается пройденное



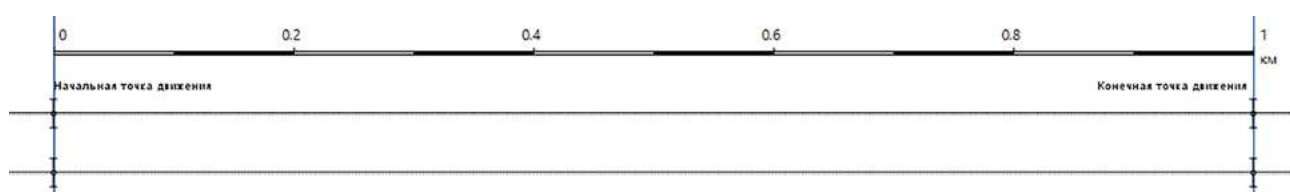


Рис. 1. Имитационная модель железнодорожной линии



Рис. 2. Блочная часть имитационной модели абстрактной экспериментальной железнодорожной линии имитирования движения с ускорением и замедлением



Рис. 3. Железнодорожная линия имитирования движения с постоянной скоростью

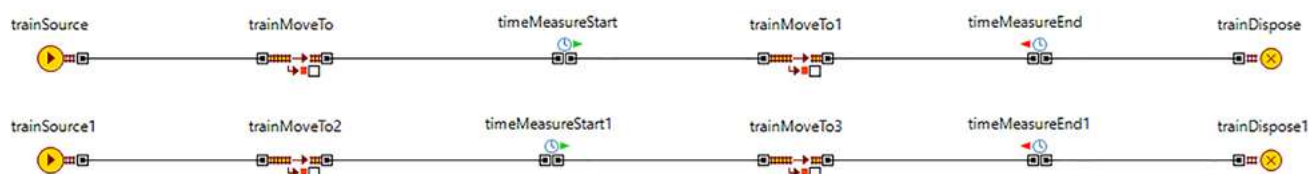


Рис. 4. Блочная часть имитационной модели абстрактной экспериментальной железнодорожной линии имитирования движения с постоянной скоростью

время, а по оси  $y$  — проценты от количества поездов конкретной категории. Рис. 2 и 3 наглядно демонстрируют структуру блочной схемы имитационной модели.

Далее производим построение имитационной модели, симулирующей движения с постоянной средней скоростью. Длина железнодорожной линии в данном случае составит 2 км, но фиксация времени следования поездов через точку условного начала движения производится с середины линии, что в совокупности также составляет расстояние в 1 км. На рис. 4 показана данная железнодорожная линия.

Блочная структура модели отличается наличием в ней дополнительного блока `trainMoveTo`, который достигается поездом расчетной средней скорости к началу рассчитываемого пути следования, поскольку в блоке зарождения поездопотоков отсутствует возможность ввода нулевой начальной скорости. На рис. 4 продемонстрирована блочная часть данной модели.

После построения блочных частей обеих имитационных моделей необходимо произвести их заполнение. В блоки `trainSource` необходимо ввести данные о времени и скорости хода скоростного поезда: скорость вводим 5 м/с, а параметры

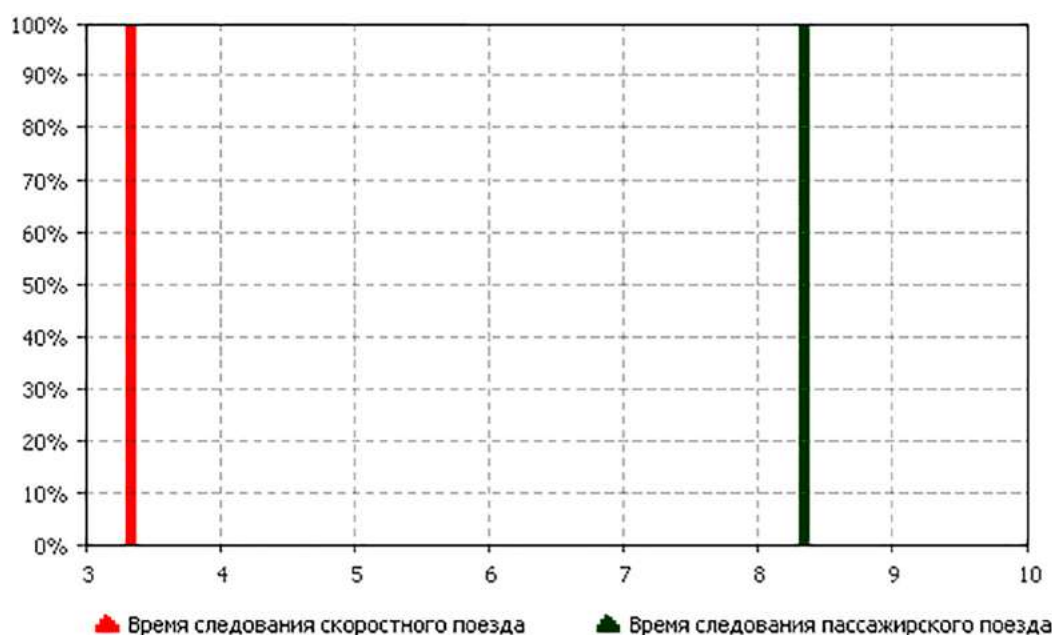


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования поездов с постоянной скоростью

увеличения и снижения скорости движения вводим 3 и 2 м/с<sup>2</sup>. Далее заполняем блок `trainSource1`, куда производим ввод аналогичных параметров, отличающихся лишь по значениям. Так, скорость следования пассажирского поезда устанавливаем в 2 м/с, увеличение скорости движения в 1 м/с<sup>2</sup> и снижение скорости в 0,5 м/с<sup>2</sup>.

При заполнении блоков `trainMoveTo`, отвечающих за движение поездов на расчетном участке, в имитационной модели, симулирующих движение поездов с постоянной скоростью, в блоках выбираем пункты соответственно «Разгонять и тормозить до крейсерской скорости», «Продолжать движение с постоянной скоростью», а в имитационной модели, симулирующей движение поездов с разгоном и замедлением, выбираем «Разгонять и тормозить до крейсерской скорости». Значение скорости указываем аналогично предыдущему.

В ходе выполнения исследования проведем два эксперимента, в одном из которых моделируемые поезда следуют с постоянной скоростью на протяжении всего маршрута следования, а во втором поезда с нулевой начальной скорости разгоняются

согласно заданным параметрам до максимальной скорости, а в конечной точке замедляются до полной остановки. Результаты приведены на гистограммах на рис. 5. В представленной работе эксперименты моделируются лишь по одному поезду.

Определяем максимальную скорость движения для поездов с увеличением и уменьшением скорости движения. Общий пройденный путь составляет 1 км согласно исходным данным. Время находим, основываясь на данных гистограммы на рис. 5: время следования по рассматриваемому участку скоростного поезда составляет 3,4 минуты, время хода пассажирского поезда — 8,4 минуты. В табл. 1 приведены вычисления наибольшей скорости.

Вычисления в табл. 1 с целью повышения точности конечного результата и исключения случайных ошибок дублированы в математическом пакете Maple.

Полученные значения вводим в блоки имитационной модели `trainSource`.

Далее вводим полученные данные по скорости в блоки `trainMoveTo`.

ТАБЛИЦА 1. Расчет ходовой скорости

| Расчетная формула                                                  | Скоростной поезд                                                     | Пассажирский поезд                                                   |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $v_{cp} = \frac{S_{общ}}{t_{общ}}, \text{ м/с}$                    | $v_{cp} = \frac{1000}{204} = 4,9 \text{ м/с}$                        | $v_{cp} = \frac{1000}{504} = 1,98 \text{ м/с}$                       |
| $t_{уск. cp} = \frac{v_{cp}}{a}, \text{ с}$                        | $t_{уск. cp} = \frac{4,9}{3} = 1,63 \text{ с}$                       | $t_{уск. cp} = \frac{1,98}{1} = 1,98 \text{ с}$                      |
| $t_{зам. cp} = \frac{v_{cp}}{b}, \text{ с}$                        | $t_{зам. cp} = \frac{4,9}{2} = 2,45 \text{ с}$                       | $t_{зам. cp} = \frac{1,98}{0,5} = 3,97 \text{ с}$                    |
| $t_{cp} = t_{общ} - t_{уск. cp} - t_{зам. cp}, \text{ с}$          | $t_{cp} = 204 - 1,63 - 2,45 = 199,91 \text{ с}$                      | $t_{cp} = 504 - 1,98 - 3,97 = 498,05 \text{ с}$                      |
| $S_{уск. cp} = \frac{a \cdot t_{уск. cp}^2}{2}, \text{ м}$         | $S_{уск. cp} = \frac{3 \cdot 1,63^2}{2} = 4 \text{ м}$               | $S_{уск. cp} = \frac{1 \cdot 1,98^2}{2} = 1,97 \text{ м}$            |
| $S_{зам. cp} = \frac{b \cdot t_{зам. cp}^2}{2}, \text{ м}$         | $S_{зам. cp} = \frac{2 \cdot 2,45^2}{2} = 6 \text{ м}$               | $S_{зам. cp} = \frac{0,5 \cdot 3,97^2}{2} = 3,94 \text{ м}$          |
| $S_{cp} = v_{cp} \cdot t_{cp}, \text{ м}$                          | $S_{cp} = 4,9 \cdot 199,91 = 979,98 \text{ м}$                       | $S_{cp} = 1,98 \cdot 498,05 = 988,19 \text{ м}$                      |
| $S_{расч} = S_{уск. cp} + S_{cp} + S_{зам. cp}$                    | $S_{расч} = 4 + 979,98 + 6 = 989,99 \text{ м}$                       | $S_{расч} = 1,97 + 988,19 + 3,94 = 994,09 \text{ м}$                 |
| $K_{погр} = \left(1 - \frac{S_{расч}}{S_{общ}}\right)$             | $K_{погр} = \left(1 - \frac{989,99}{1000}\right) = 0,1$              | $K_{погр} = \left(1 - \frac{994,09}{1000}\right) = 0,006$            |
| $K_{разг} = \frac{K_{погр} \cdot b}{(a + b)}$                      | $K_{разг} = \frac{0,1 \cdot 2}{(3 + 2)} = 0,002$                     | $K_{разг} = \frac{0,006 \cdot 0,5}{(1 + 0,5)} = 0,001$               |
| $K_{зам} = \frac{K_{погр} \cdot a}{(a + b)}$                       | $K_{зам} = \frac{0,1 \cdot 3}{(3 + 2)} = 0,003$                      | $K_{зам} = \frac{0,006 \cdot 1}{(1 + 0,5)} = 0,002$                  |
| $K_{расст. разг} = \frac{S_{расч}}{S_{общ}} + K_{разг}$            | $K_{расст. разг} = \frac{989,99}{1000} + 0,002 = 0,006$              | $K_{расст. разг} = \frac{994,09}{1000} + 0,001 = 0,003$              |
| $K_{расст. пост} = \frac{S_{расч}}{S_{общ}} - \frac{K_{погр}}{2}$  | $K_{расст. пост} = \frac{989,99}{1000} - \frac{0,1}{2} = 0,985$      | $K_{расст. пост} = \frac{989,99}{1000} - \frac{0,006}{2} = 0,991$    |
| $K_{расст. зам} = \frac{S_{расч}}{S_{общ}} + K_{зам}$              | $K_{расст. зам} = \frac{989,99}{1000} + 0,003 = 0,009$               | $K_{расст. зам} = \frac{994,09}{1000} + 0,002 = 0,006$               |
| $S_{разг} = S_{общ} \cdot K_{расст. разг}, \text{ м}$              | $S_{разг} = 1000 \cdot 0,006 = 6,05 \text{ м}$                       | $S_{разг} = 1000 \cdot 0,003 = 2,96 \text{ м}$                       |
| $S_{cp} = S_{общ} \cdot K_{расст. пост}, \text{ м}$                | $S_{cp} = 1000 \cdot 0,985 = 984,88 \text{ м}$                       | $S_{cp} = 1000 \cdot 0,991 = 991,11 \text{ м}$                       |
| $S_{зам} = S_{общ} \cdot K_{расст. зам}$                           | $S_{зам} = 1000 \cdot 0,009 = 9,07 \text{ м}$                        | $S_{зам} = 1000 \cdot 0,006 = 5,93 \text{ м}$                        |
| $V_{max} = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{разг}}{a}}, \text{ м/с}$ | $V_{max} = 3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 6,05}{3}} = 6,02 \text{ м/с}$ | $V_{max} = 1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2,96}{1}} = 2,43 \text{ м/с}$ |

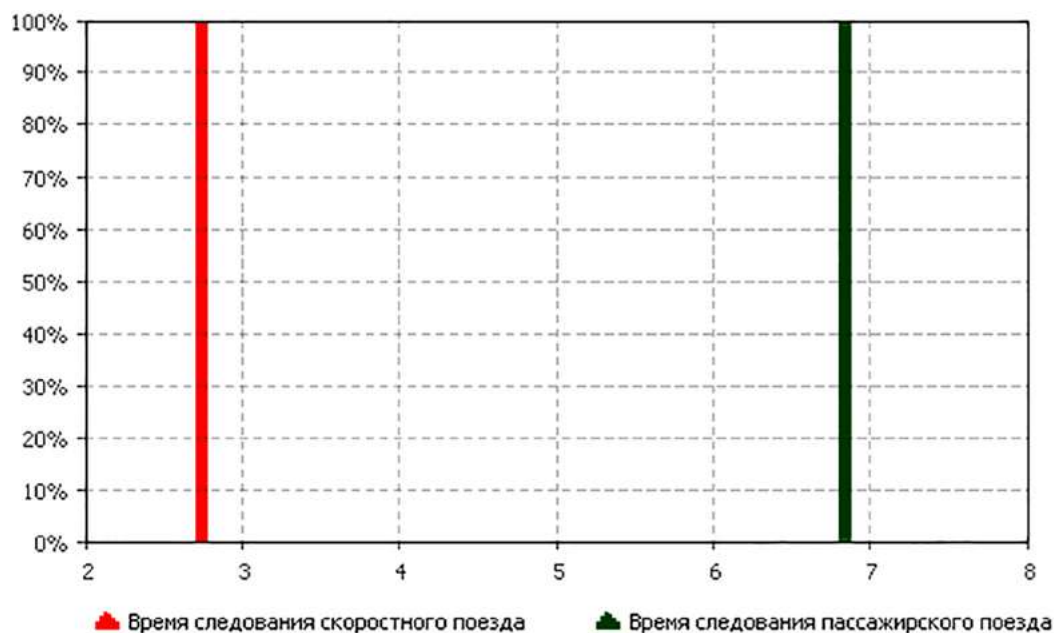


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования поездов с разгоном и торможением

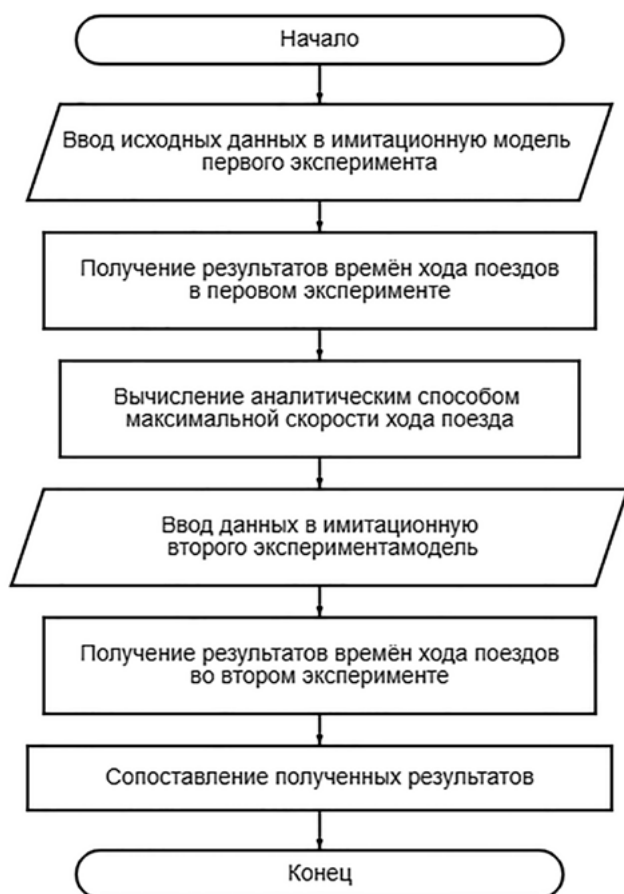


Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчета коэффициента имитационного моделирования

ТАБЛИЦА 2. Результаты следования поездов с постоянной скоростью и с ускорением и замедлением

|              | С постоянной скоростью | С ускорением и замедлением |
|--------------|------------------------|----------------------------|
| Скоростной   | 3,33                   | 2,73                       |
| Пассажирский | 8,35                   | 6,83                       |

Результаты имитационного моделирования движения поездов с разгоном и торможением отражены на диаграмме, приведенной на рис. 6.

Алгоритм описанных выше действий представлен в виде блок-схемы на рис. 7.

Всю полученную информацию указываем в табл. 2.

Полученные данные демонстрируют, что время в пути каждого поезда изменилось по сравнению с первоначальным на 82 %. Это связано с изменением характера учтенных параметров следования поездов по железнодорожной линии.

Формула расчета межпоездного интервала с учетом коэффициента имитационного моделирования будет выглядеть следующим образом:

$$I_p = \left( \frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{ср} \cdot 16,7 \cdot K_{им}} + t_b \right). \quad (3)$$

С учетом рассчитанного коэффициента формула примет следующий вид:

$$I_p = \left( \frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{ср} \cdot 16,7 \cdot 0,82} + t_b \right). \quad (4)$$

Итоговая формула расчета пропускной способности будет иметь следующий вид:

$$N_{нал} = \frac{(1440 - t_{техн})}{I_p = \left( \frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{ср} \cdot 16,7 \cdot 0,82} + t_b \right)} \cdot \alpha_n. \quad (5)$$

Полученная формула (5) в большей степени учитывает характер движения поездов на железнодорожной линии. С помощью представленной в работе имитационной модели возможно смоделировать движения поездов с различной скоростью, параметрами разгона и замедления, а также при необходимости добавить промежуточные остановки. При этом при отсутствии остановок соотношение результатов времени проследования поездом железнодорожной линии с учетом разгона и замедления по предложенной методике и по расчету лишь участковой скорости, фактически представляющей собой среднюю скорость хода поезда по участку, остается неизменным. Данная методика повышает точность производимых вычислений и позволяет организовать комплексный подход к оценке эксплуатационных расходов на содержание железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

### Библиографический список

1. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations / V. Čerić // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 1997. — Vol. 44. — Iss. 3. — Pp. 251–261.

2. Бобрик П. П. Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте / П. П. Бобрик // *Технологии построения когнитивных транспортных систем: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. — СПб., 2021.

3. Абдуллаев Ж. Я. Особенности определения пропускной способности двухпутных участков / Ж. Я. Абдуллаев // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщения*. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Вып. 3.

4. Покровская О. Д. Международная логистика Транссибирской магистрали: использование транзитного потенциала России / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // *Инновационный транспорт*. — 2016. — № 3(21). — С. 3–7.

5. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // *Мир транспорта*. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.

6. Покровская О. Д. Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов: научная монография / О. Д. Покровская. М.: Транслит, 2012. — 189 с.

7. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций / О. Д. Покровская // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. — 2018. — № 2(38). — С. 68–76.

8. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // *Инновационный транспорт*. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.

9. Altazin E. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems / E. Altazin, S. Dauzère-Pérès, F. Ramond et al. // *European Journal of Operational Research*. — 2020. — Vol. 286. — Iss. 2. — Pp. 662–672.

10. Kianinejadshah A. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment / A. Kianinejadshah, S. Ricci // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 55. — Pp. 103–109.

11. Ljubaj I. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation

Tool / I. Ljubaj, M. Mikulčić, T. J. Mlinarić // *Transportation Research Procedia*. — 2020. — Vol. 44. — Pp. 137–144.

12. Zhang X. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration / X. Zhang, L. Nie // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2016. — Vol. 68. — Pp. 509–531.

13. Cheng C. H. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire / C. H. Cheng, C. L. Chow, W. K. Chow // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2021. — Vol. 108.

14. Bulíček J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line / J. Bulíček, P. Drdla, J. Matuška // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 53. — Pp. 106–113.

15. Högdahl J. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables / J. Högdahl, M. Bohlin, O. Fröidh // *Transportation Research. Part B: Methodological*. — 2019. — Vol. 126. — Pp. 192–212.

16. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 16 ноября 2010 г. № 128. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 305 с.

17. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // *Мир транспорта*. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.

18. Pokrovskaya O. Assessment of Transport and Storage Systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — Vol. 1115. — Pp. 570–577.

19. Pokrovskaya O. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko, E. Khramtsova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry*. — INTERAGROMASH 2019. — 2019. — P. 012198.

20. Покровская О. Д. Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем / О. Д. Покровская, Т. С. Титова //

*Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 175–190.

21. Pokrovskaya O. Formation of logistics facilities in transport corridors / O. Pokrovskaya, S. Orekhov, N. Kapustina et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. “VIII International Scientific Conference Transport of Siberia — 2020”*. — 2020. — Vol. 8. — P. 012032.

22. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2022. — № 1. — С. 80–94.

23. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // *РЖД-Партнер*. — 2016.

24. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем / О. Д. Покровская // *Железнодорожный транспорт*. — 2019. — № 7. — С. 26–32.

25. Дроздова М. А. Международные санкции как средства регулирования мировой экономики / М. А. Дроздова // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 113–116.

26. Дроздова М. А. Цифровая экономика и инфляция в период пандемии / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко, Д. А. Панков // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 11–14.

27. Дроздова М. А. Цифровизация отрасли железнодорожных перевозок: проблемы и успехи / М. А. Дроздова, Е. А. Фурсова // *III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов*. — 2021. — С. 119–121.

28. Дроздова М. А. Антиглобализм в контексте современного международного экономико-правового дискурса / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко // *Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева*. — 2020. — Т. 1. — № 3(96). — С. 247–253.

29. Куренков П. В. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок / П. В. Куренков, С. П. Вакуленко // Экономика железных дорог. — 2012. — № 12. — С. 96.

30. Сафронова А. А. Формирование системы финансового менеджмента: теория, опыт, проблемы, перспективы: коллективная монография / А. А. Сафронова, Е. Н. Рудакова, П. В. Куренков и др. — М., 2018. — 228 с.

31. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. — 1998. — № 8.

32. Быкадоров С. А. Анализ методов определения себестоимости грузовых перевозок / С. А. Быкадоров, П. В. Куренков, А. В. Серкова и др. // Вестник транспорта. — 2014. — № 3. — С. 30–41.

33. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков,

П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. — 2004. — № 11. — С. 14.

34. Мохонько В. П. Проблемы создания ситуационно-аналитической системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Бюллетень транспортной информации. — 2004. — № 9. — С. 22.

Дата поступления: 24.12.2022

Решение о публикации: 20.01.2023

#### Контактная информация:

МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»; maks.marchenko1998@mail.ru

## Improvement of Analytical Method for Calculating Actual Throughput with Simulation Modeling Application

M. A. Marchenko

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

**For citation:** Marchenko M. A. Improvement of Analytical Method for Calculating Actual Throughput with Simulation Modeling Application // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 194–206. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-194-206

### Summary

**Purpose:** To develop method for calculating actual capacity on railway line on the basis of the improvement of analytical formulas and the use of simulation tools. Correction of mathematical apparatus and calculation of simulation modeling coefficient. **Methods:** Analytical method, simulation and dynamic modeling, mathematical modeling, AnyLogic Software Package tools were applied. **Research results:** New calculation approach that allows to raise railway line throughput precision. In its turn, the new approach will allow to optimize operating costs for the maintenance and current repair of railway infrastructure and rolling stock. **Practical significance:** The results obtained can be used in the analytics, prediction and modeling of transportation processes in the dispatch centers of JSC “Russian Railways” transportation management.

**Keywords:** Railway line, actual capacity, calculation formulas, simulation model, simulation coefficient.

## References

1. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations. *Mathematics and Computers in Simulation*. 1997, vol. 44, Iss. 3, pp. 251–261.
2. Bobrik P. P. *Intellektualizatsiya upravleniya dvizheniem pri tranzite na transporte. Tekhnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Intelligentization of traffic control in transit on transport. Technologies for building cognitive transport systems: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. St. Petersburg, 2021. (In Russian)
3. Abdullaev Zh. Ya. Osobennosti opredeleniya propusknoy sposobnosti dvukhputnykh uchastkov [Features of determining the capacity of double-track sections]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg. University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, vol. 3. (In Russian)
4. Pokrovskaya O. D., Samuylov V. M. *Mezhdunarodnaya logistika Transsibirskoy magistrali: ispol'zovanie tranzitnogo potentsiala Rossii* [International logistics of the Trans-Siberian Railway: the use of the transit potential of Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2016, Iss. 3(21), pp. 3–7. (In Russian)
5. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob"ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)
6. Pokrovskaya O. D. *Formirovanie terminal'noy seti regiona dlya organizatsii perevozok грузов: nauchnaya monografiya* [Formation of the terminal network of the region for the organization of cargo transportation: scientific monograph]. Moscow: TransLit Publ., 2012, 189 p. (In Russian)
7. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaya klassnost' zheleznodorozhnykh stantsiy [Logistic class of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2018, Iss. 2(38), pp. 68–76. (In Russian)
8. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozok v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure for coal transportation in Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2015, Iss. 1(15), pp. 13–23. (In Russian)
9. Altazin E., Dauzère-Pérès S., Ramond F. et al. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. *European Journal of Operational Research*. 2020, vol. 286, Iss. 2, pp. 662–672.
10. Kianinejadoshah A., Ricci S. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 55, pp. 103–109.
11. Ljubaj I., Mikulčić M., Mlinarić T. J. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 44, pp. 137–144.
12. Zhang X., Nie L. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, vol. 68, pp. 509–531.
13. Cheng C. H., Chow C. L., Chow W. K. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108.
14. Bulíčka J., Drdla P., Matuška J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 53, pp. 106–113.
15. Högdahl J., Bohlin M., Fröidh O. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables. *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2019, vol. 126, pp. 192–212.
16. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti. Utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 16 noyabrya 2010 g. № 128* [Instructions for calculating the available throughput. Approved. Order of Russian Railways



OJSC dated November 16, 2010 № 128]. Moscow: OAO “RZhD” Publ., 2011, 305 p. (In Russian)

17. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob’ektov terminal’no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)

18. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of Transport and Storage Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 1115, pp. 570–577.

19. Pokrovskaya O., Fedorenko R., Khramtsova E. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. INTERAGROMASH 2019. 2019, p. 012198.

20. Pokrovskaya O. D., Titova T. S. Instrumentariy logisticheskogo normirovaniya dlya provedeniya audita transportno-skladskikh sistem [Logistics rationing tools for auditing transport and storage systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 175–190. (In Russian)

21. Pokrovskaya O., Orekhov S., Kapustina N. et al. Formation of logistics facilities in transport corridors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Ser. “VIII International Scientific Conference Transport of Siberia 2020”. 2020, vol. 8, p. 012032.

22. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. (In Russian)

23. Pokrovskaya O. D. “Sbityy pritsel” klientoorientirovannosti [“Shot down sight” of customer orientation]. *RZhD-Partner* [RZD-Partner]. 2016. (In Russian)

24. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, Iss. 7, pp. 26–32. (In Russian)

25. Drozdova M. A. *Mezhdunarodnye sanktsii kak sredstva regulirovaniya mirovoy ekonomiki. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov III Natsional’noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [International sanctions as a means of regulating the world economy. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference]. Federal’noe agentstvo zheleznodorozhnogo transporta, FGBOU VO PGUPS [Federal Agency for Railway Transport, FGBOU VO PGUPS]. 2020, pp. 113–116. (In Russian)

26. Drozdova M. A., Kravchenko L. A., Pankov D. A. *Tsifrovaya ekonomika i inflyatsiya v period pandemii. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov III Natsional’noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digital economy and inflation during a pandemic. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: a collection of proceedings of the III National Scientific and practical conference]. FGBOU VO PGUPS Publ., 2020, pp. 11–14. (In Russian)

27. Drozdova M. A., Fursova E. A. *Tsifrovizatsiya otrasli zheleznodorozhnykh perevozok: problemy i uspekhi. III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [Digitalization of the railway transportation industry: problems and successes. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings]. 2021, pp. 119–121. (In Russian)

28. Drozdova M. A., Kravchenko L. A. Antiglobalizm v kontekste sovremennogo mezhdunarodnogo ekonomiko-pravovogo diskursa [Antiglobalism in the context of modern international economic and legal discourse]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva* [Bulletin of the Volga University. V. N. Tatishcheva]. 2020, vol. 1, Iss. 3(96), pp. 247–253. (In Russian)

29. Kurenkov P. V., Vakulenko S. P. Finansovo-ekonomicheskoe reshenie problemy prigorodnykh perevozok [Financial and economic solution to the problem of suburban transportation]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Economics of Railways]. 2012, Iss. 12, p. 96. (In Russian)

30. Safronova A. A., Rudakova E. N., Kurenkov P. V. et al. *Formirovanie sistemy finansovogo menedzhmenta: teoriya, opyt, problemy, perspektivy: kollektivnaya monografiya* [Formation of the financial management system: theory, experience, problems, prospects: collective monograph]. Moscow, 2018, 228 p. (In Russian)

31. Baritko A. L., Kurenkov P. V. *Organizatsiya i tekhnologiya vneshnetorgovykh perevozok* [Organization and technology of foreign trade transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1998, Iss. 8. (In Russian)

32. Bykadorov S. A., Kurenkov P. V., Serkova A. V. et al. *Analiz metodov opredeleniya sebestoimosti gruzovykh perevozok* [Analysis of methods for determining the cost of freight transportation]. *Vestnik transporta* [Transport Bulletin]. 2014, Iss. 3, pp. 30–41. (In Russian)

33. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. *Situatsionnoe upravlenie perevozochnym protsessom* [Situational management of the transportation process].

*Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management: scientific information collection]. 2004, Iss. 11, p. 14. (In Russian)

34. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. *Problemy sozdaniya situatsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte* [Problems of creating a situational-analytical system for managing the transportation process in railway transport]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2004, Iss. 9, p. 22. (In Russian)

Received: December 24, 2022

Accepted: January 20, 2023

**Author's information:**

Maxim A. MARCHENKO — Postgraduate Student of the Department “Operational Work Management”; maks.marchenko1998@mail.ru

УДК 53.06

## Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи

П. В. Борисов<sup>1</sup>, А. А. Воробьев<sup>1</sup>, К. В. Константинов<sup>2</sup>, И. К. Самаркина<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина), Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, Инструментальная ул., 2

**Для цитирования:** Борисов П. В., Воробьев А. А., Константинов К. В., Самаркина И. К. Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 207–221. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221

### Аннотация

**Цель:** Проведение исследования по получению данных, связывающих напряжение литий-ионной аккумуляторной батареи с возмущающими воздействиями протекающего тока, синтез схемы замещения накопителя, получение алгоритма расчета параметров элементов схемы замещения по экспериментальным данным с последующей проверкой адекватности модели. **Методы:** Прогнозирование работы литий-ионной аккумуляторной батареи по средствам формы напряжения из-за возмущающих воздействий протекающего синусоидального и скачкообразного пульсирующего тока. Модели ячеек в виде эквивалентных схемы замещения дающие представления о состоянии аккумулятора, хоть и не обладающие всеми характеристиками физической модели батареи. **Результаты:** Рассмотрен алгоритм синтеза схемы замещения литий-ионной аккумуляторной батареи, проведен физический эксперимент по нахождению параметров схемы замещения, составлена математическая модель по результатам исследования, подтверждена ее адекватность. **Практическая значимость:** Проведенное исследование дало возможность отработки алгоритма расчета параметров для формирования алгоритма функциональной диагностики литий-ионных аккумуляторных батарей.

**Ключевые слова:** Литий-ионная аккумуляторная батарея, функциональная диагностика, схема замещения, внутреннее сопротивление аккумулятора.

### Введение

Диагностика литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) дает возможность наблюдения за текущим состоянием аккумуляторных батарей, в том числе за снижением остаточного ресурса. [1] Таким образом возможно спрогнозировать количество оставшихся циклов, что позволит использовать повторно отработанный накопитель, в случае если его характеристики будут соответствовать эксплуатационным значениям.

При переходе от рассмотрения структуры аккумулятора к анализу электрических характеристик прежде всего возникает задача синтеза схемы замещения. Синтезом электрической цепи называют определение структуры цепи и числовых значений, составляющих ее пассивных ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) и активных (источников ЭДС и тока) элементов по временным характеристикам, при воздействии на вход импульса известной формы, либо известным описанием цепи в операторной форме. Однако одному и тому же состоянию аккумулятора, принятому в качестве

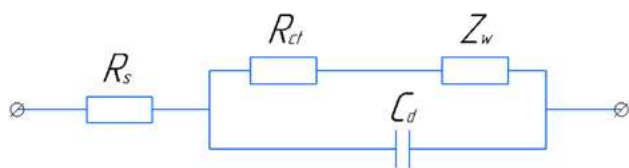


Рис. 1. Схема Рендлса как пример схемы ячейки

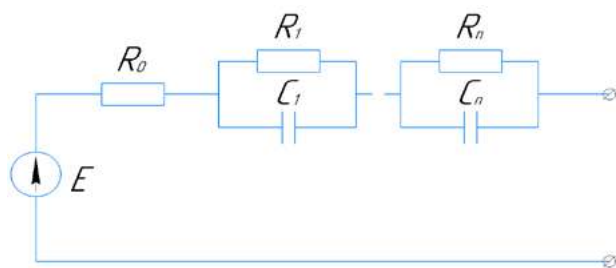


Рис. 2. Схема замещения ЛИА

исходного, могут соответствовать несколько различных схем разной структуры [2].

Известна связь [3] между изменением структуры слоев аккумуляторной батареи ее внутренним сопротивлением  $Z$ . В литературе [4, 5] встречаются модели эквивалентных схем, например схема Рендлса, которая нередко приводится как пример эквивалентной схемы элемента аккумуляторной батареи (рис. 1).

Схема Рендлса представляет собой эквивалентную электрическую цепь ЛИА, которая состоит из [6]:

- $R_s$  — активного сопротивления электролита;
- $R_{ct}$  — сопротивления переноса заряда, моделирующего падение напряжения на границе «электрод — электролит» из-за нагрузки;
- $C_{dl}$  — емкость, моделирующая эффект зарядов, накапливающихся в электролите на поверхности электрода;
- $Z_w$  — импеданс Варбурга. Сопротивление Варбурга моделирует диффузию ионов лития в электродах.

Для эквивалентности схемы замещения необходимо бесконечное число резисторно-конденса-

торных цепей, однако схему можно упростить. Поскольку емкость двойного слоя оказывает незначительное влияние на характеристики схемы Рендлса на низких частотах, ей можно пренебречь, а импеданс Варбурга заменить конечным числом параллельных цепей «резистор — конденсатор», соединенных последовательно. Тогда модель ячейки сводится к схеме замещения с дополнительными парами «резистор — конденсатор», изображенной на рис. 2 [7, 8].

Схема замещения позволяет использовать характеристики ее элементов в качестве параметров диагностики ЛИА. Для понимания процессов, происходящих в аккумуляторной батарее, необходимо рассмотреть структуру накопителя как электрической цепи со своими параметрами и свойствами.

При использовании способа построения цепи замещения ЛИА с помощью элементов, описывающих работу аккумуляторной батареи, любое расхождение между цепью замещения и наблюдаемым физическим объектом считается ошибкой моделирования. Данная ошибка моделирования анализируется, для ее уменьшения данные уточняются, пока уровень ошибки не снизится, чтобы его можно было идентифицировать как «достаточно хороший».

Можно решать обратную задачу: подбирать структуру и параметры схемы замещения для исследуемой аккумуляторной батареи так, чтобы при заданном законе изменения во времени входной величины  $x_{\text{вх}}(t)$  получить заданный закон изменения во времени выходной величины  $x_{\text{вых}}(t)$ . Переходя к лапласовым изображениям  $X_{\text{вх}}(p) = L\{x_{\text{вх}}(t)\}$  и  $X_{\text{вых}}(p) = L\{x_{\text{вых}}(t)\}$ , получим заданную передаточную функцию цепи

$$K(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)}.$$

Тогда задачу можно поставить

следующим образом: по заданной передаточной функции  $K(p)$ , а также по заданной частотной

характеристике  $K(j\omega)$  нужно найти структуру цепи и ее параметры [9].

Рассмотрим аккумуляторный накопитель как двухполюсник — «черный ящик» (см. рис. 3). В качестве входной величины принимается ток заряда (разряда) ЛИА  $I_1(j\omega)$ , а напряжение на зажимах  $U_1(j\omega)$  — в качестве выходной величины.

Представленный на рис. 3 двухполюсник ЛИА в качестве «черного ящика» включает в себя сопротивление  $Z$  и  $E$  — источник ЭДС.  $Z$  отражает накопленный заряд и энергию, выделяемую в виде тепл на аккумуляторной батарее, а  $E$  представляет собой напряжение разомкнутой цепи аккумуляторной батареи.

Для данного двухполюсника в качестве передаточной функции можно выбрать  $Z(j\omega)$  или обратную ему величину — входную проводимость  $Y(j\omega)$ , которую можно назвать переменной характеристикой цепи (1):

$$K(j\omega) = \frac{U_1(j\omega)}{I_1(j\omega)} = Z(j\omega). \quad (1)$$

Все ранее описанное позволяет привести схему замещения ЛИА к  $\Gamma$ -образной. Двухполюсник аккумуляторной батареи путем выделения простейших элементных составляющих будет иметь вид, представленный на рис. 4.

На схеме замещения ЛИА, представленной на рис. 4:

- сопротивление  $R$  представляет сопротивление электродов;
- двухполюсник  $R_1C_1, R_nC_n$ , представляющий межполюсное пространство, заполняемое электролитом, с емкостью  $C_1, C_n$ , и сопротивлением  $R_1, R_n$ , которое во время работы проявляется в виде тепла, выделяемого ЛИА;
- ЭДС ЛИА  $E$  представляет собой разность потенциалов между электродами.

Индуктивностью можно пренебречь, так как магнитное поле у аккумуляторной батареи пренебрежимо мало и должно учитываться только

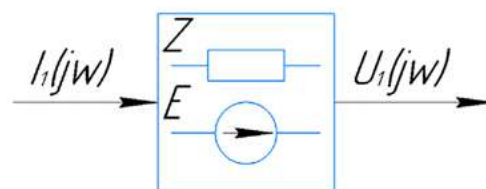


Рис. 3. Двухполюсник ЛИА, представленный как «черный ящик»

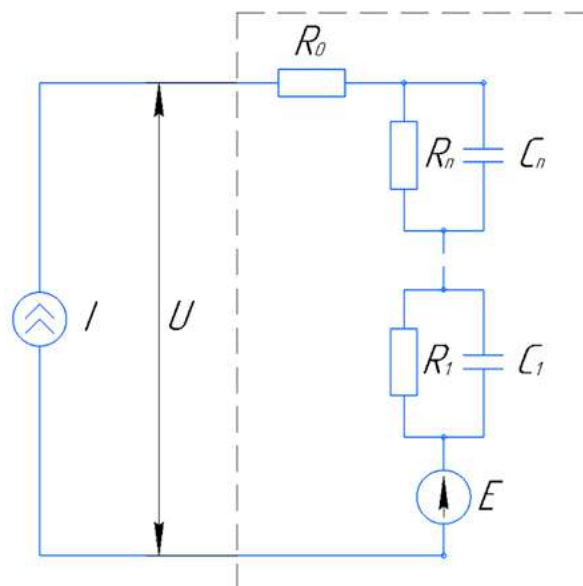


Рис. 4.  $\Gamma$ -образная схема замещения ЛИА

при работе аккумуляторной батареи на большой частоте.

На первом этапе синтеза схемы замещения следует установить, реализуема ли физически цепь, заданная своей передаточной функцией  $K(p)$  или выходными функциями  $Z(p)$  и  $Y(p)$  при помощи элементов  $R$  и  $C$ .

На втором этапе следует реализовать функции цепи методами определения ее структуры и параметров, разработанными в теории синтеза схемы замещения, стремясь к уменьшению и упрощению синтезируемой цепи. При этом, выбирая метод синтеза, необходимо учитывать неоднозначность решения в смысле структуры синтезируемой схемы.



Рис. 5. Исследуемая ячейка ЛИА

ТАБЛИЦА 1. Параметры батареи CATL LFP 92 Amh (паспортные данные)

|                          |       |             |
|--------------------------|-------|-------------|
| Емкость                  | А · ч | 92          |
| Рабочее напряжение       | В     | 3.2         |
| Импеданс (1 кГц)         | мОм   | < 0,4       |
| Заряд (стандартн/макс.)  |       | 1,0 C/3,2 C |
| Разряд (стандартн/макс.) |       | 1,0 C/2,0 C |



Рис. 6. Испытательный стенд Chroma 17011 Battery Cell Test

Функции цепи  $K(p)$ ,  $Z(p)$  и  $Y(p)$  являются функциями комплексного переменного решения или комплексной частоты  $p = s + j\omega$ , которые определяются распределением их нулей и полюсов.

Заданное  $Z(p)$  двухполюсника представляется как (2):

$$\begin{aligned}
 Z(p) &= R_0 + Z_1(p) + \dots + Z_{n-1}(p) + Z_n(p) = \\
 &= R_0 + \frac{1}{\frac{1}{C_1} + p + \frac{1}{R_1 C_1}} + \dots + \frac{1}{\frac{1}{C_{n-1}} + p + \frac{1}{R_{n-1} C_{n-1}}} + \frac{1}{\frac{1}{C_n} + p + \frac{1}{R_n C_n}} = \\
 &= R_0 + \frac{b_1}{p + d_1} + \dots + \frac{b_{n-1}}{p + d_{n-1}} + \frac{b_n}{p + d_n}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $b$  — операторное сопротивление  $\frac{1}{C}$ ;

$d$  — операторное сопротивление  $\frac{1}{RC}$ .

С течением времени изменяется состояние аккумуляторной батареи,  $R_1$ ,  $C_1$  меняет свое значение, представляя этот двухполюсник как некое множество последовательно подключенных цепей  $R_n, C_n$ .

$$Z_1(p) = \sum \frac{b_n}{p + d_n}. \quad (3)$$

В своей основе двухполюсник состоит из  $R, C$  составляющих, описанных в формуле (4):

$$Z(p) = R_0 + \sum_{n=1}^m \frac{b_n}{p + d_n}, \quad (4)$$

где  $b = \frac{1}{C_n}$ ;  $d = \frac{1}{R_n C_n}$ .

Для определения параметров схемы замещения аккумуляторной батареи как двухполюсника было проведено исследование литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи производ-



| No. | Step Name    | Setting |      |      | Cut-Off Condition |           | Jump |       | Loop  |      |       | Cycle |       |       | Record                              | Descripti |
|-----|--------------|---------|------|------|-------------------|-----------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------|-----------|
|     |              | V(V)    | I(A) | P(W) | Parameter         | Value     | Mode | Value | Label | Loop | Count | Label | Cycle | Count |                                     |           |
| 1   | REST         |         |      |      | Time(sec)         | >= 10     | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 2   | CC Discharge |         | 92   |      | V(V)              | < 2.8     | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 3   | REST         |         |      |      | Time(sec)         | >= 60     | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 4   | Waveform(A)  |         |      |      | Time(sec)         | >= 360000 | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 5   | REST         |         |      |      | Time(sec)         | >= 60     | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 6   | Waveform(A)  |         |      |      | Time(sec)         | >= 360000 | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 7   | REST         |         |      |      | Time(sec)         | >= 60     | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 8   | Waveform(A)  |         |      |      | Time(sec)         | >= 360000 | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 9   | REST         |         |      |      | Time(sec)         | >= 60     | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 10  | Waveform(A)  |         |      |      | Time(sec)         | >= 360000 | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |
| 11  | REST         |         |      |      | Time(sec)         | >= 60     | Next | -     |       |      |       |       |       |       | <input checked="" type="checkbox"/> |           |

Рис. 7. Алгоритм исследования ЛИА, записанный в среде Chroma ПО

ства фирмы CATL емкостью 92 Ач (см. рис. 5) зав. № 03A6W0330374. Данные по батарее приведены в табл. 1, а внешний вид — на рис. 5.

Предварительно для ячейки батареи был произведен полный заряд батареи (согласно ГОСТ Р МЭК 62620—2016 п. 6.2) [10].

Испытание проходило на испытательном стенде Chroma 17011 Battery Cell Test, представленном на рис. 6.

Программное обеспечение Chroma ПО позволяет реализовать алгоритм управления током заряда/разряда ЛИА определенного значения и формы тока, что изображено на рис. 8 и 9. Данные формы заносятся в алгоритм, приведенный на рис. 7, все данные записываются в среде MS Office Excel.

Алгоритм испытания включает в себя ряд экспериментов:

- разряд постоянным током единичным скачком;
- разряд постоянным током с синусоидальной пульсацией;
- разряд постоянным током со скачкообразной пульсацией.

В экспериментах с синусоидальной и скачкообразной пульсацией опыт производился с частотой от 1 до 10 Гц. Для минимизации погрешности и повышения достоверности результатов все эксперименты велись на одном аккумуляторе единым алгоритмом с минутным тайм-аутом

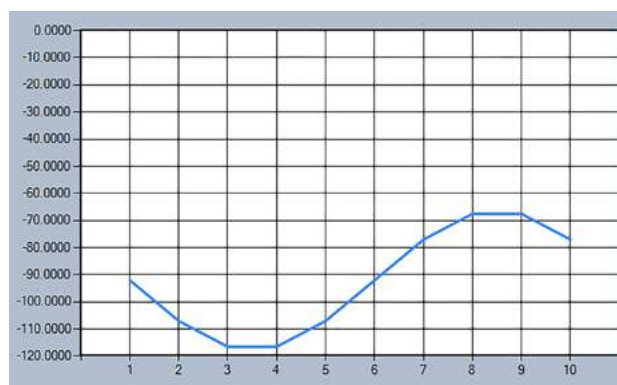


Рис. 8. Синусоидальная форма тока, записанная в алгоритм

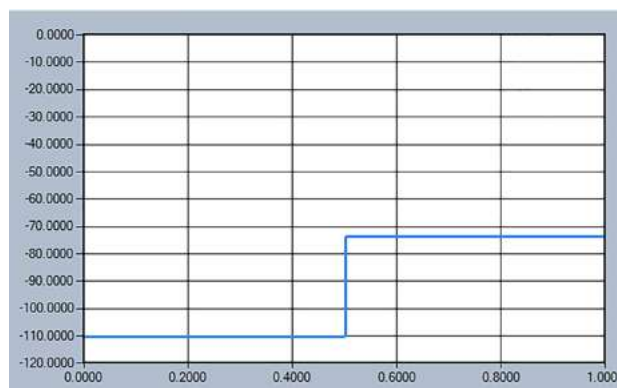


Рис. 9. Скачкообразная форма тока, записанная в алгоритм

между разрядными нагрузками во избежание влияния экспериментов друг на друга.

В эксперименте разряда производился наброс и удержание номинального тока разряда испытуемой ЛИА, равного 92 А, в течение 20 с. Кривые тока и напряжения разряда представлены на рис. 10 и 11.

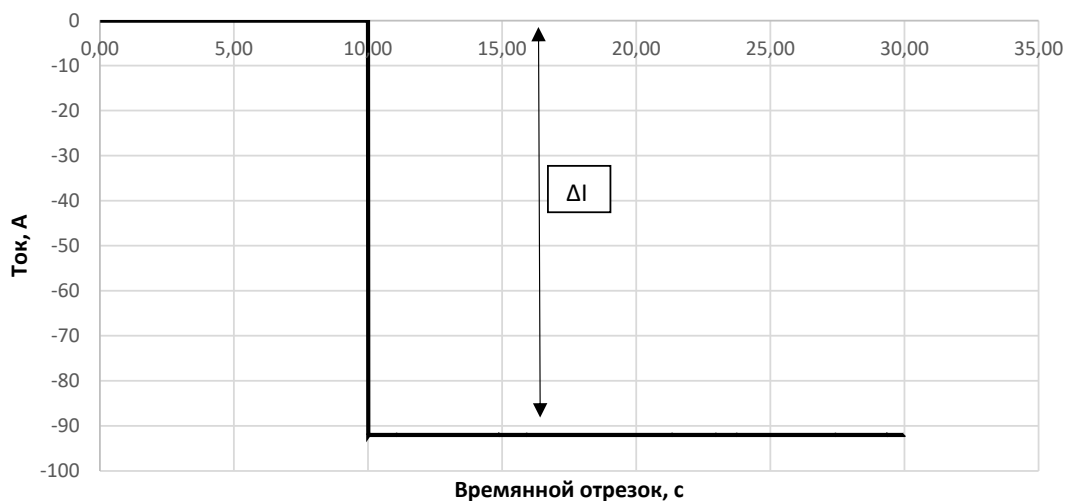


Рис. 10. Форма тока  $I(t)$  в эксперименте с набросом номинального разрядного тока

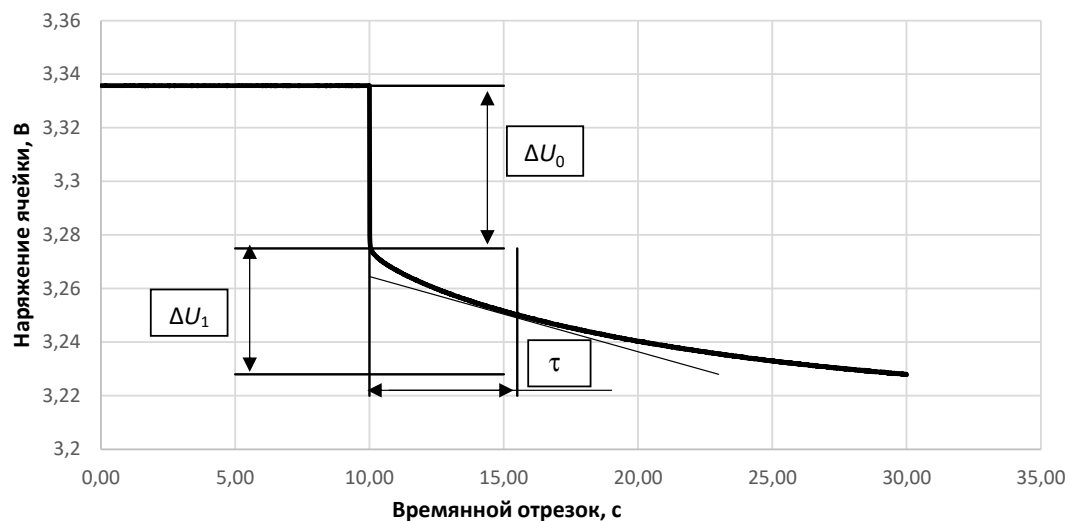


Рис. 11. Форма напряжения  $U(t)$  в эксперименте с набросом номинального разрядного тока с поясняющими обозначениями

В результате эксперимента были получены следующие графики  $U(t)$  и  $I(t)$ .

### 1. Разряд постоянным током

На основании рис. 10 и 11 графики кривых измерения  $U(t)$  и  $I(t)$  ЛИА можно разделить на следующие части:

- от 0 до 10 секунд — напряжение на зажимах ЛИА без нагрузки, так называемый холостой ход накопителя;
- момент подключения нагрузки  $\Delta U_0$  выражается в резком падении напряжения при набросе

номинального разрядного тока в  $\Delta I$ , что свидетельствует о наличии составляющей активного сопротивления;

- от 10 до 20 — плавное падение напряжения на величину  $\Delta U_1$ , кривая падения напряжения свидетельствует о наличии составляющих активного и емкостного сопротивления.

По результатам данного эксперимента вычисляются элементы замещения (5–7), из которых состоит схема замещения двухполюсника аккумуляторной батареи, представленная на рис. 4.



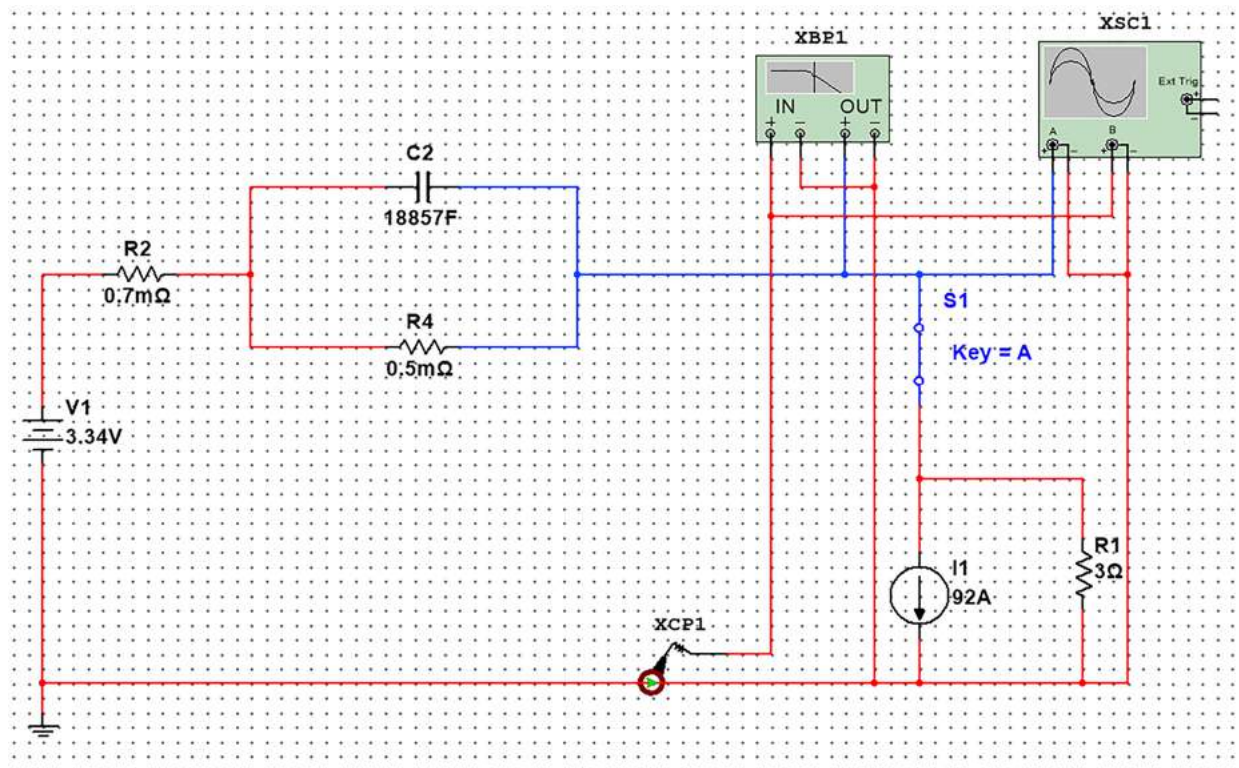


Рис. 12. Схема замещения ЛИА со значениями, полученными в результате эксперимента

$$R_1 = \frac{\Delta U_1}{\Delta I} = \frac{3,275 - 3,23}{92} = 0,5 \text{ мОм.} \quad (6)$$

$$\text{Частота сопряжения } \omega = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{5,5 \text{ с}}, \text{ где } \tau = 5,5 \text{ с.}$$

$$C = \tau \frac{R_0 + R_1}{R_0 \cdot R_1} = 5,5 \cdot \frac{(0,7 + 0,5)10^{-3}}{0,7 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 18857 \text{ Ф.} \quad (7)$$

Полученные значения подставляются в модель ЛИА в виде цепи замещения в среде Multisim [11], изображенной на рис. 12, которая включает в себя:

- V1 — ЭДС ЛИА напряжения на разомкнутых клеммах аккумуляторной батареи;
- $R_0, R_1, C$  — Z ЛИА, представленный в модели в виде двух резисторов и одного конденсатора;
- XBP1 — анализатор цепи, регистрирующий АЧХ и ФЧХ исследования;

– XSC1 — осциллограф, регистрирующий параметры тока (посредством датчика тока XCP1) и напряжения ЛИА на протяжении всего исследования;

- $R_3$  — шунтирующий резистор;
- S1 — ключ.

В результате эксперимента с набросом номинального тока разряда были получены следующие формы  $I(t)$  и  $U(t)$ , представленные на рис. 13 и 14.

## 2. Разряд синусоидально пульсирующим током

В эксперименте разряда номинальным током с синусоидальной пульсацией производился наброс и удержание номинального тока испытуемой ЛИА разряда в течение 20 с с синусоидальной пульсацией со среднеквадратичным отклонением 20 %. График изображен на рис. 15.

В результате эксперимента с набросом номинального тока разряда с синусоидальной пульса-

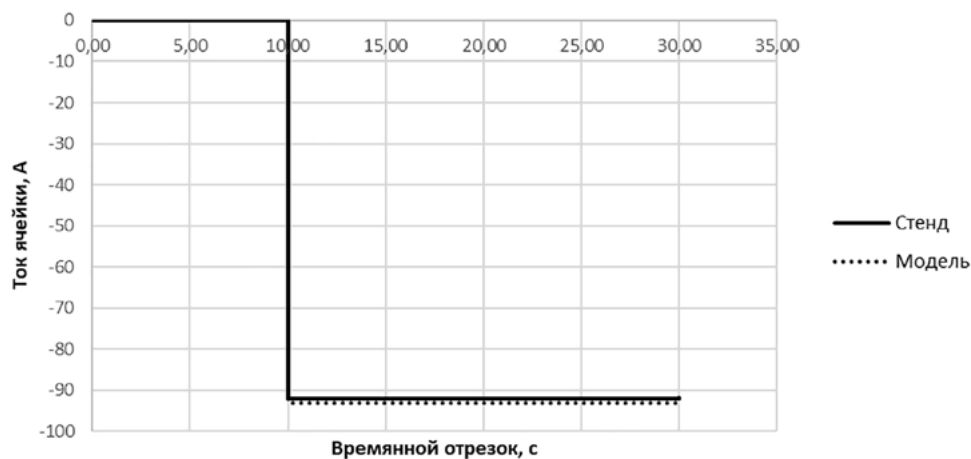


Рис. 13. Форма тока  $I(t)$  с набросом номинального разрядного тока по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

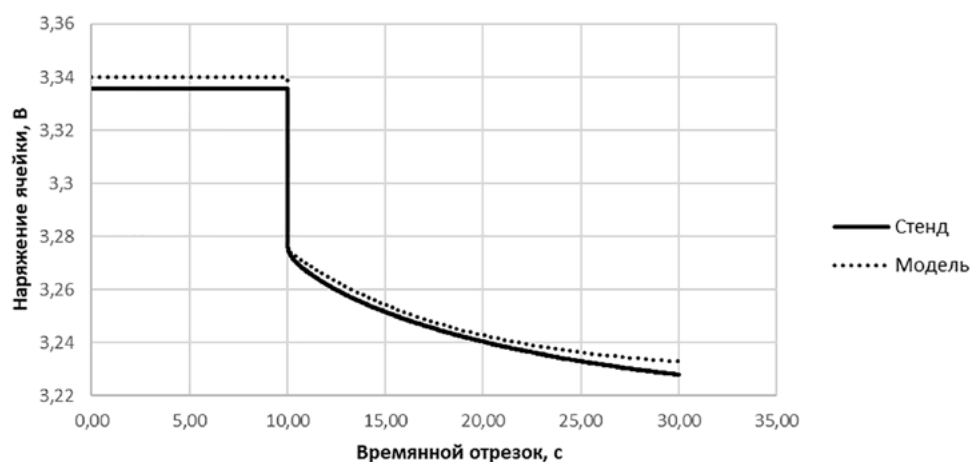


Рис. 14. Форма напряжения  $U(t)$  с набросом номинального разрядного тока по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

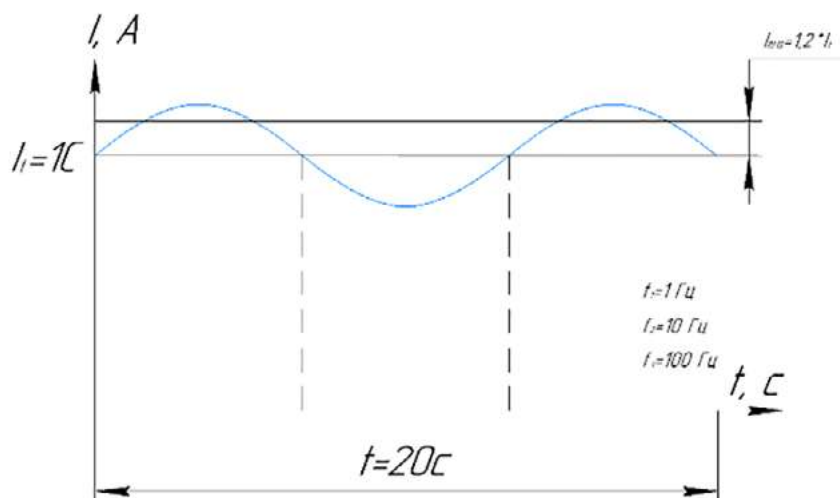


Рис. 15. Разряд ЛИА с синусоидальной пульсацией при разной частоте пульсации

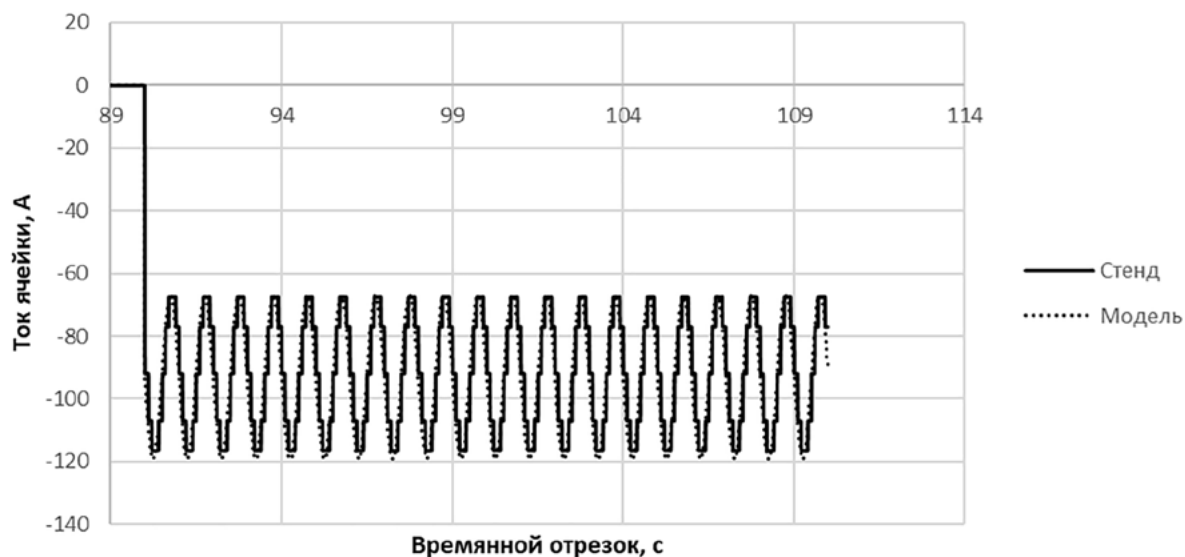


Рис. 16. Форма тока  $I(t)$  с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

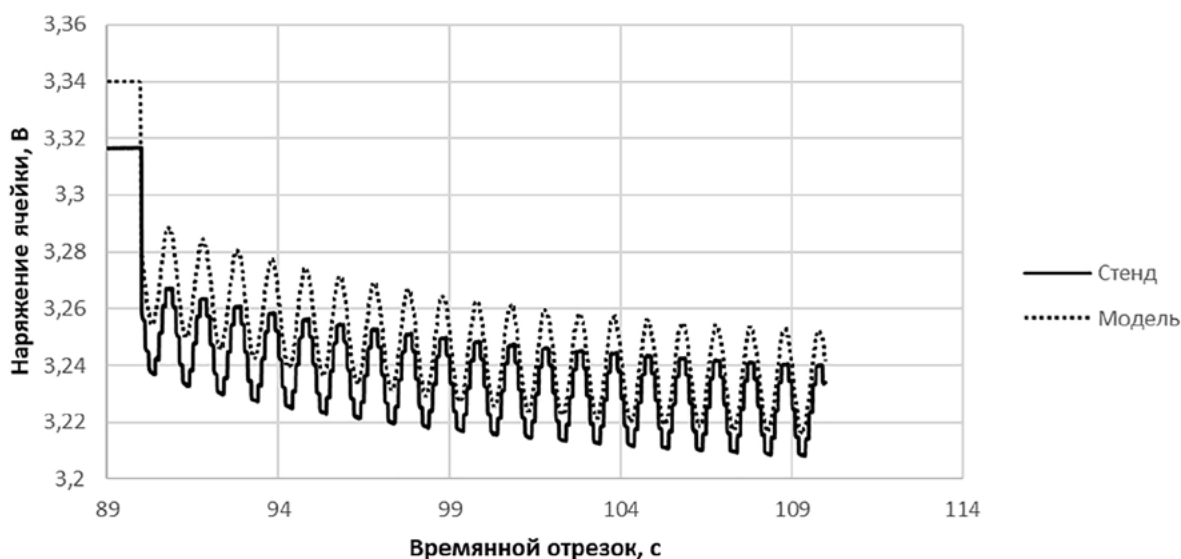


Рис. 17. Форма напряжения  $U(t)$  с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

цией были получены формы  $I(t)$  и  $U(t)$  с частотой пульсации 1 Гц, представленные на рис. 16 и 17, и с частотой 10 Гц — на рис. 18 и 19 соответственно.

### 3. Разряд скачкообразно пульсирующим током

В эксперименте разряда номинальным током со скачкообразной пульсацией производился

наброс и удержание номинального тока разряда испытуемой ЛИА в течение 20 с со скачкообразной пульсацией со среднеквадратичным отклонением 20 %. График изображен на рис. 20.

В результате эксперимента с набросом номинального тока разряда со скачкообразной пульсацией были получены следующие формы  $I(t)$  и  $U(t)$  с частотой пульсации 1 Гц, представленные

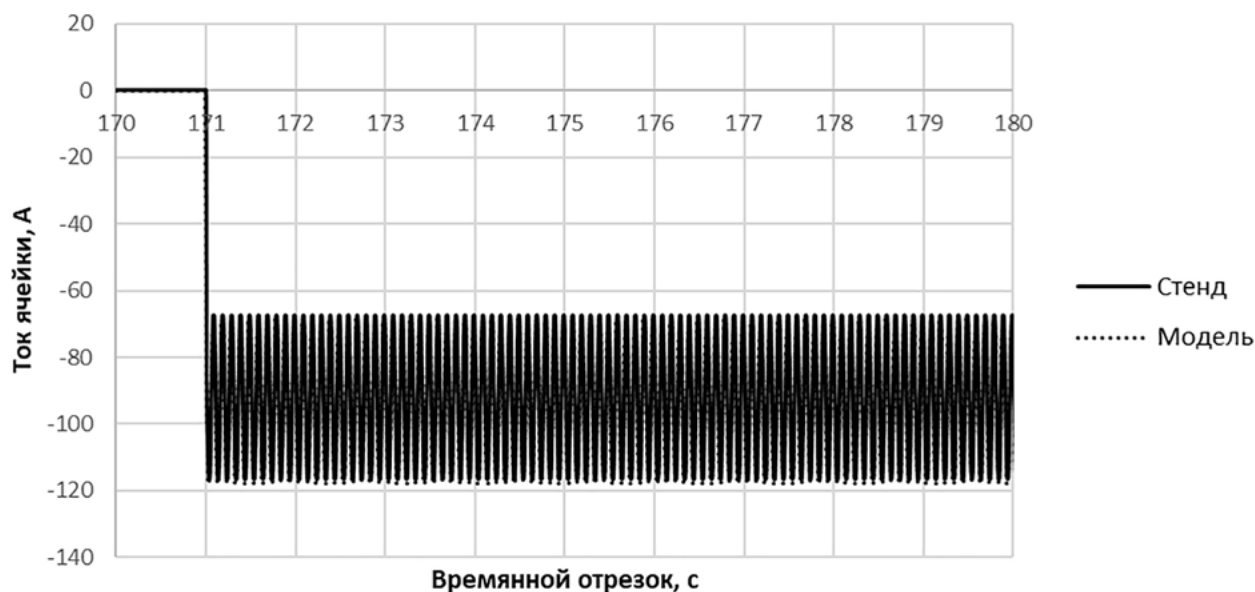


Рис. 18. Форма тока с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 10 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

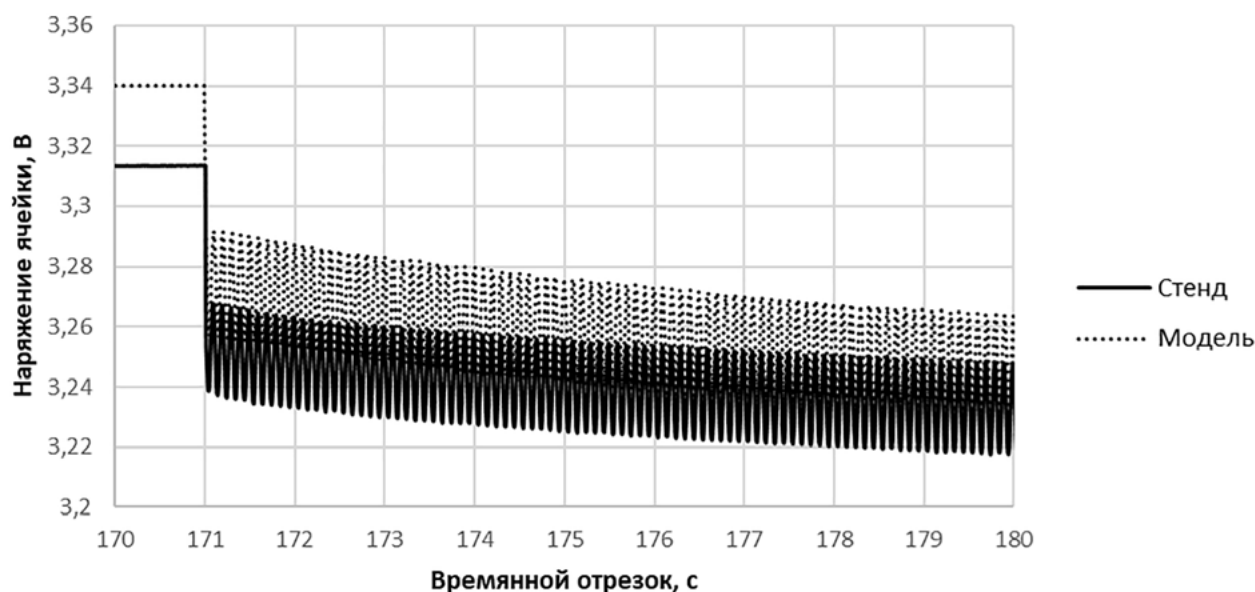


Рис. 19. Форма напряжения  $U(t)$  с набросом номинального разрядного тока с синусоидальной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

на рис. 21 и 22, и с частотой 10 Гц — на рис. 23 и 24 соответственно.

Графики реального напряжения (значения, полученные на стенде) при синусоидально и скачкообразно пульсирующей нагрузках не совпадают по уровню напряжения, полученному

на модели (отстают примерно на 0,2 В). Причиной этому служат идеальные условия модели, а именно отсутствие восстановления (отдыха ЛИА) между шагами нагрузки (значение напряжения на клеммах реального аккумулятора не успевало восстановиться за 1 минуту). В следу-

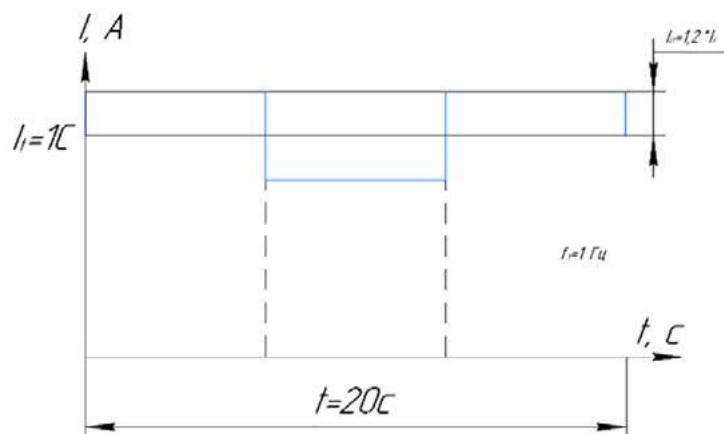


Рис. 20. Разряд ЛИА с скачкообразной пульсацией при разной частоте пульсации

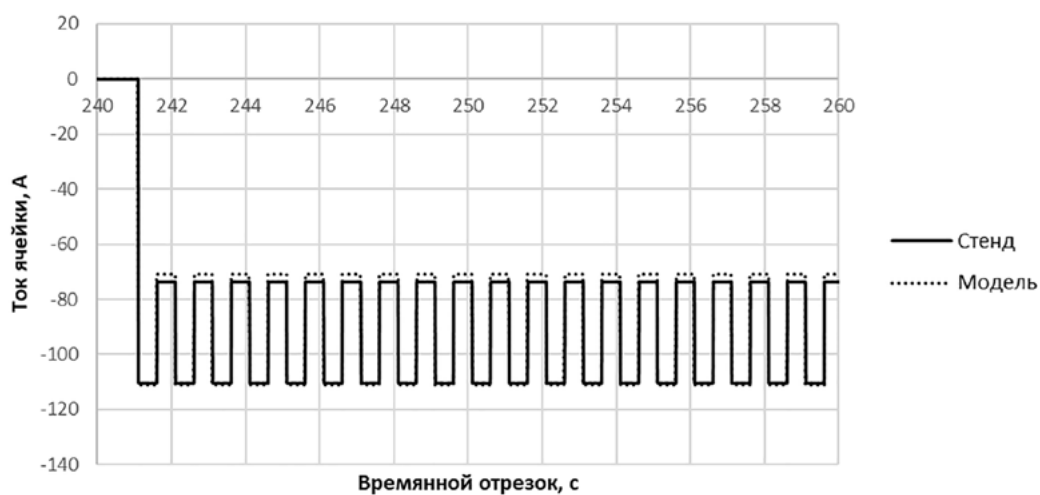


Рис. 21. Форма тока  $I(t)$  с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

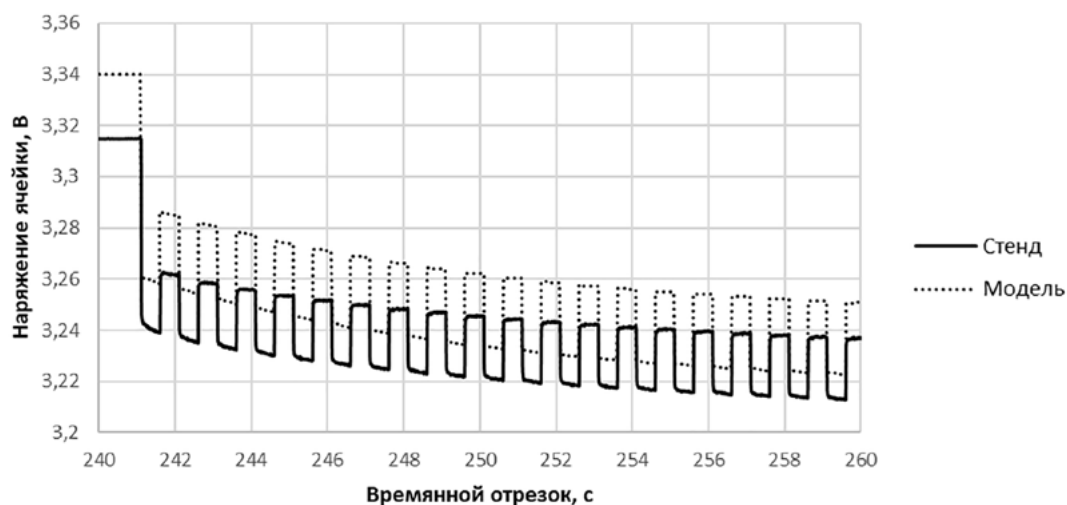


Рис. 22. Форма напряжения  $U(t)$  с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 1 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

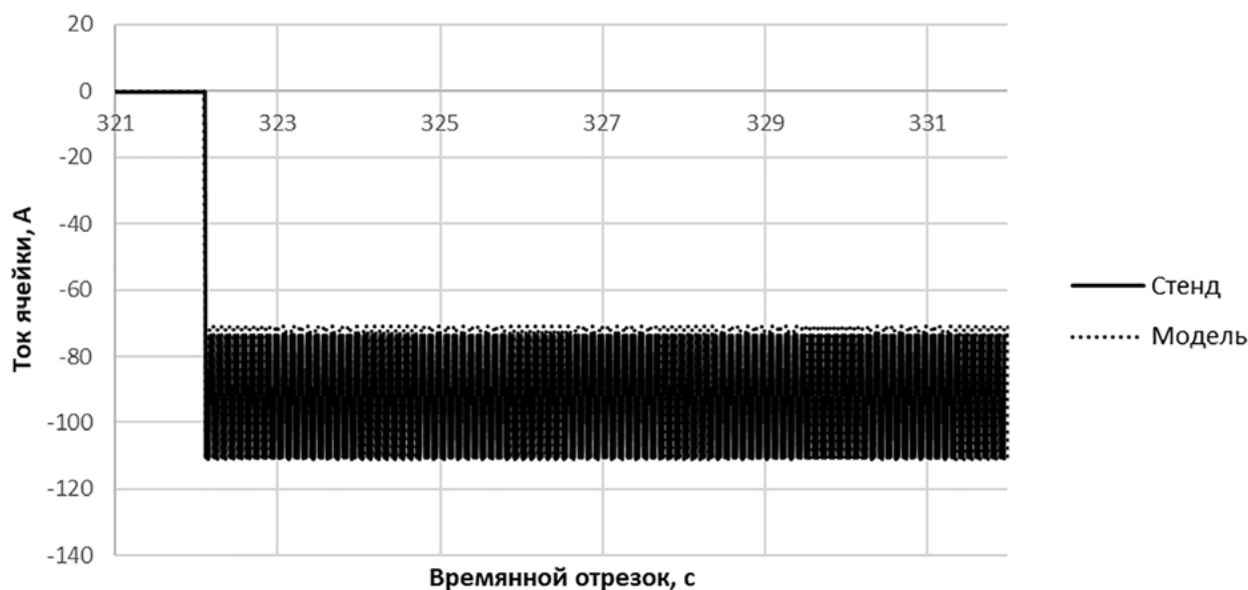


Рис. 23. Форма тока  $I(t)$  с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 10 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

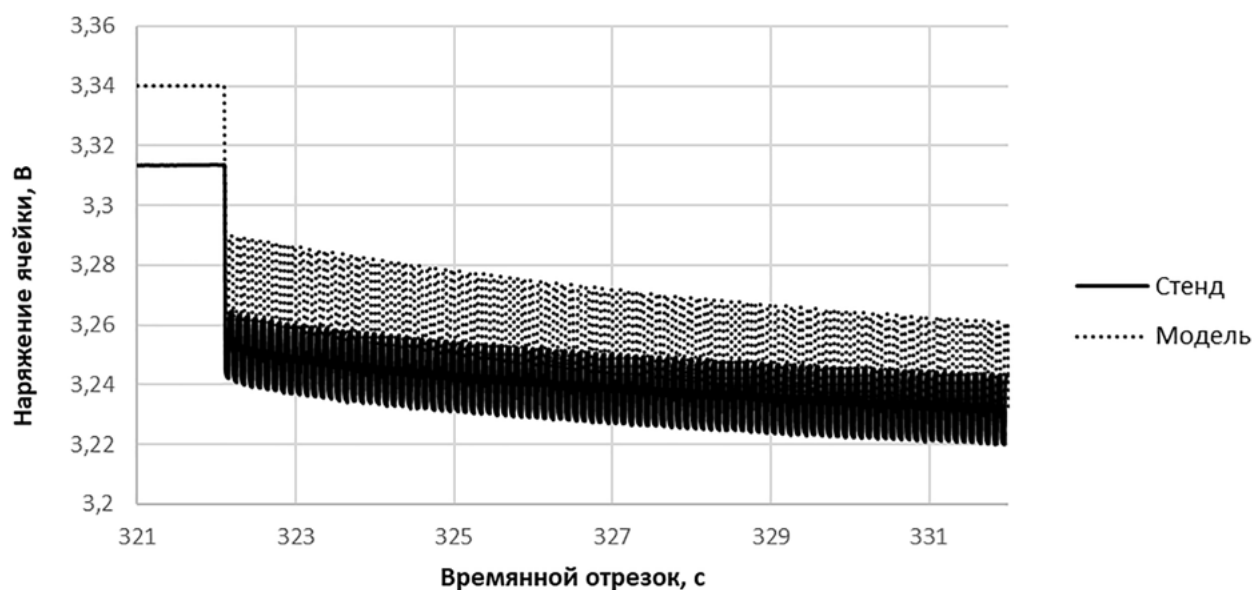


Рис. 24. Форма напряжения  $U(t)$  с набросом номинального разрядного тока со скачкообразной пульсацией 10 Гц по результатам стендового исследования и моделирования схемы замещения

ющих экспериментах время между экспериментами будет увеличено, так чтобы данный фактор не влиял на итоговый результат.

В рамках данного эксперимента были исследованы АЧХ и ФЧХ синтезированной цепи схемы замещения ЛИА, которые представлены на рис. 25 и 26.

### Заключение

В статье рассмотрено исследование литий-ионной аккумуляторной батареи, получена модель в виде эквивалентной схемы замещения для элемента ЛИА, а так же приведена методика расчета её составных элементов.

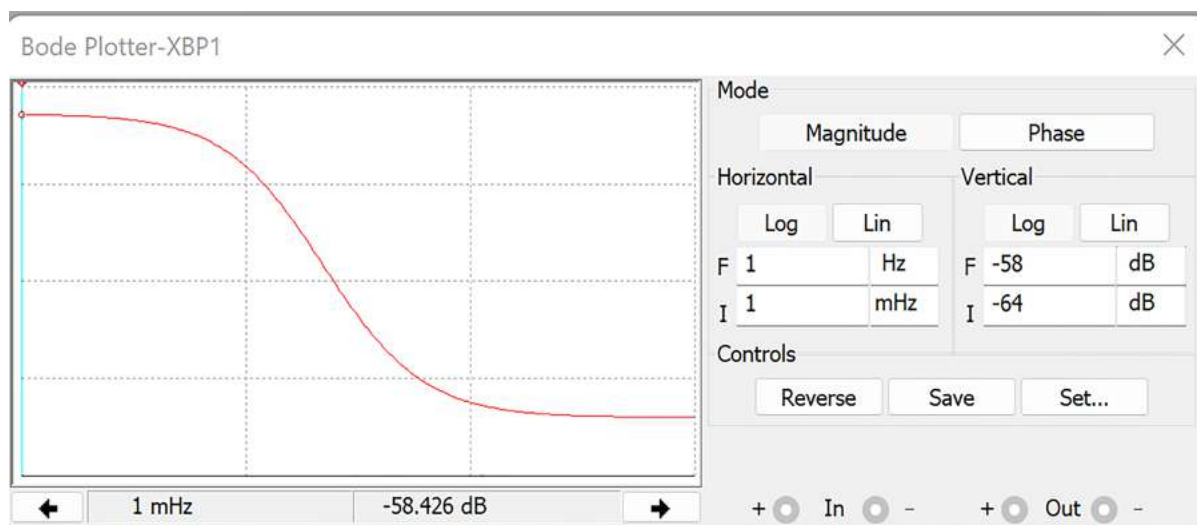


Рис. 25. АЧХ синтезированной цепи схемы замещения ЛИА

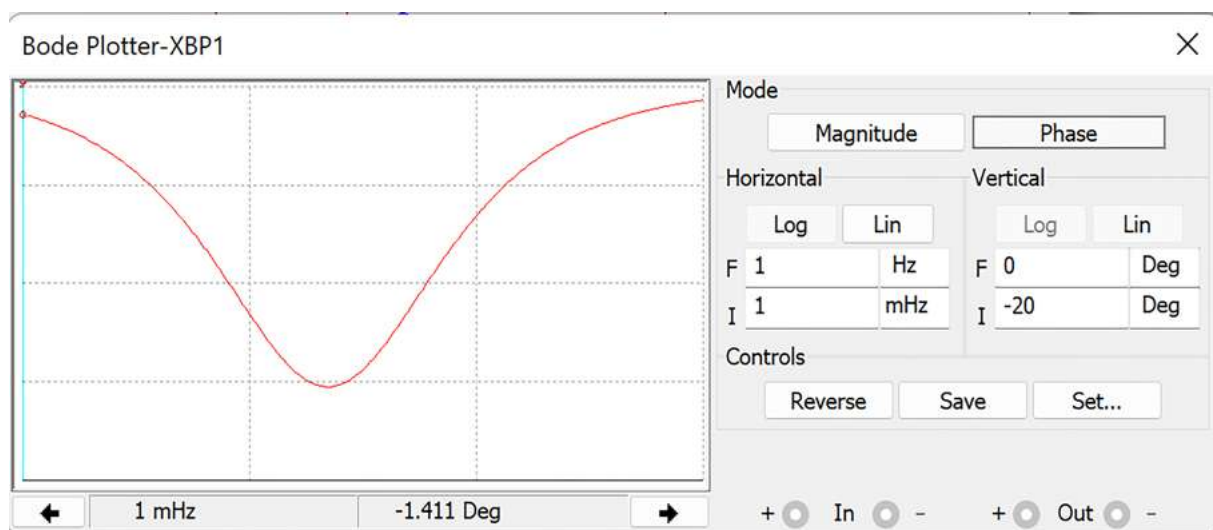


Рис. 26. ФЧХ синтезированной цепи схемы замещения ЛИА

Результаты данного исследования являются основанием для разработки алгоритма диагностирования аккумуляторной батареи при работе с импульсными преобразователями энергии. Используя методы тестовой диагностики ЛИА, в частности, резкий сброс и наброс нагрузки, а также разного рода пульсации, можно исследовать состояния аккумуляторной батареи.

По результатам данного исследования планируется набрать статистические данные по аккумуляторной батарее с разной степенью отработки для формирования связи между характеристиками элемента ЛИА и его схемой замещения.

### Библиографический список

1. Хандорин М. М. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора в режиме реального времени / М. М. Хандорин, В. Г. Букреев // Электрохимическая энергетика. — 2014. — Т. 14. — № 2. — С. 78–84.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи 8-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Бессонов. — М.: Высшая школа, 1984. — 559 с.
3. Доброго К. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. — 2021. —

Т. 64. — № 1. — С. 27–39. — DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.

4. Randles J. E. B. Kinetics of rapid electrode reactions / J. E. B. Randles // *Discussions of the Faraday Society*. — 1947. — Iss. 1. — Pp. 11–19.

5. Плетт Г. Л. Системы контроля аккумуляторной батареи / Г. Л. Плетт. — 2015. — С. 61–63.

6. Гнеденков С. В. Импедансная спектроскопия в исследовании процессов переноса заряда / С. В. Гнеденков, С. Л. Синябрюхов // *Вестник ДВО РАН*. — 2006. — № 5. — С. 6–16.

7. Gregory L. P. Battery Management Systems / L. P. Gregory // Artech House. — 2015. — Vol. I. — 343 p.

8. Борисевич А. В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния / А. В. Борисевич // *Современная техника и технологии*. — 2014. — № 5. — URL: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3542>.

9. Зевеке Г. В. Основы теории цепей: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил и др. — М.: Энергия, 1975. — 752 с.

10. ГОСТ Р МЭК 61960—2007. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи литиевые для портативного применения. — М.: Стандартинформ, 2008. — 11 с.

11. Шестеркин А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10 / А. Н. Шестеркин. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 943 с.

Дата поступления: 09.01.2023

Решение о публикации: 10.02.2023

#### Контактная информация:

БОРИСОВ Павел Владимирович — аспирант;  
[nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич —  
д-р техн. наук, доц.; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)

КОНСТАНТИНОВ Константин Валерьевич —  
канд. техн. наук, доц.; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)

САМАРКИНА Ирина Константиновна —  
канд. техн. наук, доц.; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)

## Research of Lithium-Ion Battery Characteristics

P. V. Borisov<sup>1</sup>, A. A. Vorobyev<sup>1</sup>, K. V. Konstantinov<sup>2</sup>, I. K. Samarkina<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>St. Petersburg State Electrotechnical University named after A.I. Ulyanov (Lenin), 2, Instrumentalnaya, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

**For citation:** Borisov P. V., Vorobyev A. A., Konstantinov K. V., Samarkina I. K. Research of Lithium-Ion Battery Characteristics // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 207–221. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221

### Summary

**Purpose:** To conduct research on obtaining data, that ties lithium-ion battery voltage to perturbing effects of current flow, to synthesize accumulator equivalent circuit, to obtain algorithm for calculating element parameters for accumulator equivalent circuit on experimental data basis with subsequent check of the model adequacy. **Methods:** Prediction of lithium-ion accumulator work by means of voltage shape because of perturbative impacts of flowing sinusoidal intermittent pulsating current. The models of cells in the form of equivalent circuit that play battery state, though not possessing all characteristics of battery physical model. **Results:** Algorithm for lithium-ion battery equivalent circuit synthesis has been considered, physical experiment on finding accumulator equivalent circuit parameters was conducted,



mathematical model on the research results has been compiled and its adequacy has been confirmed. **Practical significance:** The pursued study made it possible to work out algorithm for calculating parameters to form the algorithm of lithium-ion battery functional diagnosis.

**Keywords:** Lithium-ion battery, functional diagnostics, equivalent circuit, internal resistance of the battery.

## References

1. Khandorin M. M., Bukreev V. G. Otsenka ostatochnoy emkosti lityi-ionnogo akkumulyatora v rezhime real'nogo vremeni [Estimation of the residual capacity of a lithium-ion battery in real time]. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical Energy]. 2014, vol. 14, Iss. 2, pp. 78–84. (In Russian)
2. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi 8-e izd., pererab. i dop.* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits 8th ed. revised and extended]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1984, 559 p. (In Russian)
3. Dobrego K. V., Bladyko Yu. V. Modelirovanie akkumulyatornykh batarey i ikh sborok s uchetom degradatsii parametrov [Modeling of storage batteries and their assemblies, taking into account the degradation of parameters]. *Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. ob"edineniy SNG* [Energy. Izv. higher textbook institutions and energy. associations of the CIS]. 2021, vol. 64, Iss. 1, pp. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>. (In Russian)
4. Randles J. E. B. Kinetics of rapid electrode reactions. *Discussions of the Faraday Society*. 1947, Iss. 1, pp. 11–19.
5. Plett G. L. *Sistemy kontrolya akkumulyatornoy batarei* [Battery monitoring systems]. 2015, pp. 61–63. (In Russian)
6. Gnedenkov S. V., Sinebryukhov S. L. Impedansnaya spektroskopiya v issledovanii protsessov perenosa zaryada [Impedance spectroscopy in the study of charge transfer processes]. *Vestnik DVO RAN* [Vestnik FEB RAS]. 2006, Iss. 5, pp. 6–16. (In Russian)
7. Gregory L. P. *Battery Management Systems*. Artech House. 2015, vol. I, 343 p.
8. Borisevich A. V. Modelirovanie lityi-ionnykh akkumulyatorov dlya sistem upravleniya batareyami: obzor tekushchego sostoyaniya [Simulation of lithium-ion batteries for battery management systems: a review of the current state]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii* [Modern Technique and Technologies]. 2014, Iss. 5. Available at: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3542>. (In Russian)
9. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V. et al. *Osnovy teorii tsepey: uchebnik dlya vuzov. 4-e izd., pererab.* [Fundamentals of Circuit Theory. Textbook for Universities. 4th revised edition]. Moscow: Energia Publ., 1975. 752 p. (In Russian)
10. GOST R IEC 61960—2007. *Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei, sodержashchie shchelochnoy i drugie nekislotnye elektrolity. Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei litievye dlya portativnogo primeneniya* [GOST R IEC 61960—2007. Batteries and rechargeable batteries containing alkaline and other non-acidic electrolytes. Lithium batteries and rechargeable batteries for portable applications]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. 11 p. (In Russian)
11. Shesterkin A. N. *Sistema modelirovaniya i issledovaniya radioelektronnykh ustroystv Multisim 10* [System for modeling and research of radio electronic devices Multisim 10]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 943 p. (In Russian)

Received: January 09, 2023

Accepted: February 10, 2023

## Author's information:

Pavel V. BORISOV — Postgraduate Student; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)  
Aleksandr A. VOROBYEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)  
Konstantin V. KONSTANTINOV — PhD in Technical Sciences, Associate Professor; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)  
Irina K. SAMARKINA — PhD in Technical Sciences, Associate Professor; [nttk@pgups.ru](mailto:nttk@pgups.ru)

УДК 621.311.26

## Электрификация валдайского сельского поселения за счет применения альтернативных возобновляемых источников энергии

А. В. Ключина, А. А. Кипина, И. Д. Туманов, И. А. Терёхин, И. А. Баранов

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

**Для цитирования:** Ключина А. В., Кипина А. А., Туманов И. Д., Терёхин И. А., Баранов И. А. Электрификация валдайского сельского поселения за счет применения альтернативных возобновляемых источников энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 222–230. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-222-230

### Аннотация

**Цель:** Провести исследование по электрификации отдаленного малого поселения в рамках декарбонизации энергетики при помощи возобновляемых источников энергии. **Методы:** Анализ текущей электрификации малого поселения, нормативных документов и статистики, проведение экономических расчетов на основании проведенного анализа. **Результаты:** Сделан выбор из наиболее распространенных вариантов альтернативной электрификации в пользу солнечно-ветряной электростанции. Выполнена экономическая оценка предложенного варианта электрификации в рамках декарбонизации энергетики, в результате которой определена величина необходимых инвестиций, а также срок окупаемости проекта, на основании которого можно судить об экономической эффективности проекта. **Практическая значимость:** Показана эффективность введения альтернативной энергетики в малых поселениях, отдаленных от единой энергетической системы.

**Ключевые слова:** Зеленая энергетика, альтернативная энергетика, ветряная энергетика, солнечная энергетика, электрификация, декарбонизация.

### Введение

В настоящее время на территории Российской Федерации существует проблема электроснабжения малых поселений, находящихся на значительном расстоянии от единой энергетической системы (ЕЭС) страны. Во многом электрификация таких участков организована при помощи дизель-генераторных станций. Основными недостатками такой системы являются ограниченная мощность вырабатываемой электрической энергии, прямая зависимость от дизельного топлива, а также низкое качество электрической энергии. На примере Валдайского сельского поселения рассмотрим возможность применения альтернативных источников энергии.

### Проблематика

#### и актуальность проекта

Валдайское сельское поселение — муниципальное образование в составе Сегежского района Республики Карелии Российской Федерации. Административный центр — поселок Валдай (рис. 1). Численность населения составляет менее 1000 человек на 3778 км<sup>2</sup> [1].

Основные потребители: МБУ «С-Н» (забор и очистка воды для питьевых и промышленных нужд), МКОУ СОШ п. Валдай (школа), котельная, местная религиозная организация [2].

Система электроснабжения Валдайского сельского поселения состоит из:



Рис. 1. Фрагмент карты п. Валдай

1) источника электрической энергии — два дизель-генератора (Cummins C5500D5, 400 кВт), один из которых находится в резерве;

2) линии электропередачи (ЛЭП) от дизель-генераторов — представляют собой воздушные линии (ВЛ) напряжением 0,4 кВ [3].

Электроснабжение за счет использования дизель-генераторов имеет следующие недостатки:

1) высокие требования, предъявляемые к качеству топлива;

2) дизель-генератор работает в оптимальном режиме, когда подключенная к нему нагрузка составляет от 40–80 % мощности. Если дизель-генератор будет работать на полную мощность, то это может привести к перегрузке, снижению срока эксплуатации. Также в режиме низкой загруженности и холостого хода происходит интенсивный износ внутренних узлов и деталей;

3) установки большой мощности требуют устройства отдельной системы охлаждения, вентиляции и несущих конструкций для их безопасной работы в помещении;

4) сравнительно высокая стоимость электроэнергии (ЭЭ).

### Зеленая энергетика

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 29 августа 2020 г. № 1298 «О вопросах стимулирования использования возобновляемых источников энергии, внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и о признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» приоритетом при модернизации системы электроснабжения в малых поселениях будет за развитием зеленой энергетики [4].

Возобновляемая энергия (ВЭ) — это энергия, получаемая из ресурсов, которые с течением обозримого промежутка времени по меркам жизни человека естественным образом пополняются в достаточном количестве. Она включает в себя такие источники, как солнечный свет, ветер, дождь, приливы, волны и геотермальное тепло. В табл. 1 представлены достоинства и недостатки возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [5].

### Географические характеристики района

Карелия отличается непостоянством климата из-за ее территориальных особенностей. Климат

ТАБЛИЦА 1. Достоинства и недостатки ВИЭ

| № п/п | ВИЭ                     | Достоинства                                                                                  | Недостатки                                                      |
|-------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1     | Ветряные электростанции | Быстрая установка                                                                            | Высокая стоимость строительства                                 |
|       |                         | Простота обслуживания                                                                        | Нестабильность производства энергии (зависимость от силы ветра) |
|       |                         | Отсутствие загрязнения окружающей среды (ВЭС не производят угарный газ, углекислоту и т. д.) | Шумовое загрязнение (до 50 дБ на расстоянии более 1 км)         |
|       |                         | —                                                                                            | Изменение ландшафта                                             |
| 2     | Солнечные панели        | Доступность источника энергии                                                                | Низкий КПД                                                      |
|       |                         | Бесплатное потребление                                                                       | Поток лучей непостоянен                                         |
|       |                         | Высокая износостойкость                                                                      | Большая площадь, занимаемая системой                            |
|       |                         | Бесшумность                                                                                  | —                                                               |



| Схема районирования территории Российской Федерации по климатическим поясам |                    |                                       |                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Класс защиты                                                                | Климатический пояс | Температура воздуха зимних месяцев, ° | Скорость ветра в зимние месяцы, м/с |
| 4                                                                           | Особый             | –25                                   | 6,8                                 |
| 3                                                                           | 4                  | –41                                   | 1,3                                 |
| 2                                                                           | 3                  | –18                                   | 3,6                                 |
| 1                                                                           | 1–2                | –9,7                                  | 5,6                                 |

Рис. 2. Климатические зоны РФ

тический режим республики можно охарактеризовать как переходный от морского к континентальному.

Климат Карелии относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Среднегодовая скорость ветра — 3,5–5 м/с, увеличиваясь до 5,5–7 м/с в прибрежных районах Белого моря и

крупных озер, и до 7,6 м/с на островах Онежского озера. Наибольшие скорости ветра (до 25–30 м/с) отмечаются в холодный период, преимущественно в октябре — ноябре (см. рис. 2).

Летом продолжительность солнечного сияния составляет не более 37 % от возможного, на севере республики составляет в среднем 1560 часов за

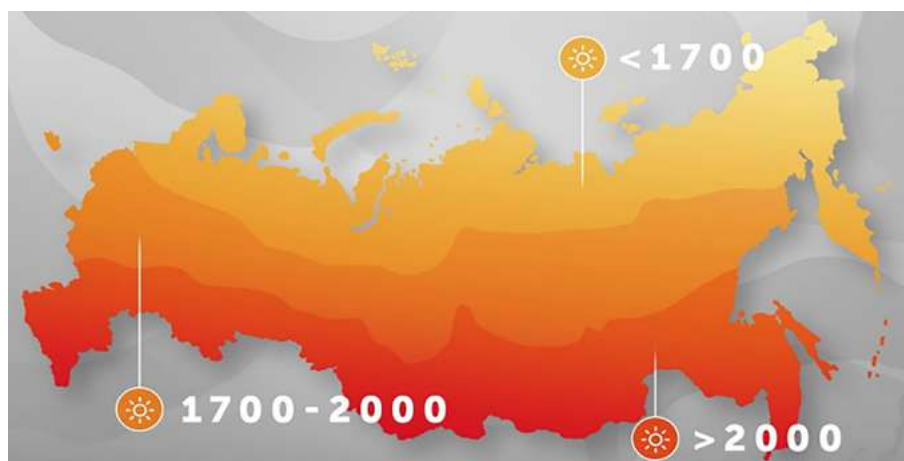


Рис. 3. Солнечные ресурсы РФ, количество часов в год

год, на юго-западе — 1749 часов за год (рис. 3). Также летом в Карелии есть белые ночи. Длятся они в этом регионе с 26 мая по 17 июля. В период летнего солнцестояния, с 20 по 22 июня, световой день длится более 19 часов [6].

Анализируя все особенности климата и приведенные данные, мы рассмотрим наиболее перспективный вариант развития альтернативной энергетики — установка комбинированной системы солнечно-ветряной станции [7].

### Рассмотрение альтернативных источников энергии

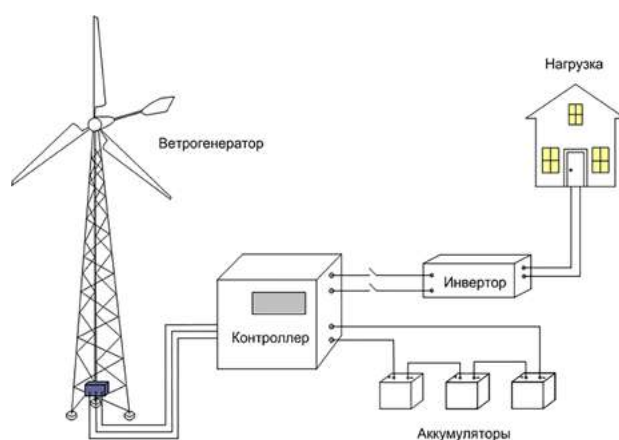
Согласно климатическим условиям, в качестве источника энергии выбираем комбинированную солнечно-ветряную электростанцию. В нашем случае будем рассматривать солнечные энергосистемы (СЭС), использующие фотоэлектрические модули (солнечные батареи) и ветроэлектрические установки (ВЭУ). Структурные схемы СЭС и ВЭУ представлены на рис. 4. [8, 9].

При описании характеристик и рассмотрении структурных схем можно сделать вывод о том, что схема работы ВЭУ аналогична схеме работы СЭС, следовательно, есть возможность их совместного использования.

Так как в рассматриваемом районе средняя скорость ветра равняется 4,5 м/с, а количество



а



б

Рис. 4. Структурные схемы:  
а — солнечной энергосистемы;  
б — ветроэлектрической установки



ТАБЛИЦА 2. Комплектация солнечно-ветряной электростанции GREEN OPTIMAL 12 кВт

| Наименование                                   | Количество |
|------------------------------------------------|------------|
| Солнечная батарея 240W                         | 12 шт.     |
| Аккумулятор DeltaGX12-200                      | 8 шт.      |
| Преобразователь HYBRID 48В 12кВт               | 1 шт.      |
| Контроллер заряда ECO Энергия MPPT Pro 200/100 | 1 шт.      |
| Защита всех линий                              | 1 шт.      |
| Датчик тока ДТ-325                             | 2 шт.      |
| PV-кабель FLEX-SOL-XL                          | 50 м.      |
| Штекера и коннекторы                           | 1 компл.   |
| Ветрогенератор 5/7 кВт-48Vdc LOW WIND          | 1 шт.      |

солнечного сияния в году составляет около 37 % от возможного, то выбираем гибридную солнечно-ветряную электростанцию GREEN OPTIMAL 12 кВт, комплектация которой приведена в табл. 2. Для выбора гибридной электростанции были произведены сравнения четырех солнечно-ветровых электростанций — GreenDem 13 кВт, АТОН ВС-10, Green benefit 5 кВт и GREEN OPTIMAL 12кВт.

При изучении таких характеристик, как — номинальная мощность, стоимость за штуку

и общая стоимость, был сделан вывод о том, что наиболее оптимальной по стоимости является именно солнечно-ветровая электростанция GREEN OPTIMAL 12кВт.

Так как активная мощность дизель-генератора равна 400 кВт — чего достаточно для снабжения всех потребителей с учетом резерва мощности и перспектив развития поселения [10], то необходимое количество таких электростанций составляет 34 штуки с учетом резерва. Также для обеспечения бесперебойной подачи энергии рекомендуется оставить один резервный дизельный генератор — Cummins C500D5. Структурная схема электростанции представлена на рис. 5 [11].

### Экология и влияние на здоровье человека

Несмотря на все преимущества данного метода выработки энергии, большое количество людей смущает то, что огромные лопасти ВЭУ будут негативно сказываться на их здоровье, а также будут угрожать жизни животных, в частности — птиц.

По мнению Всемирной организации здравоохранения, нет никаких доказательств того, что шум ниже слухового порога вызывает какие-либо

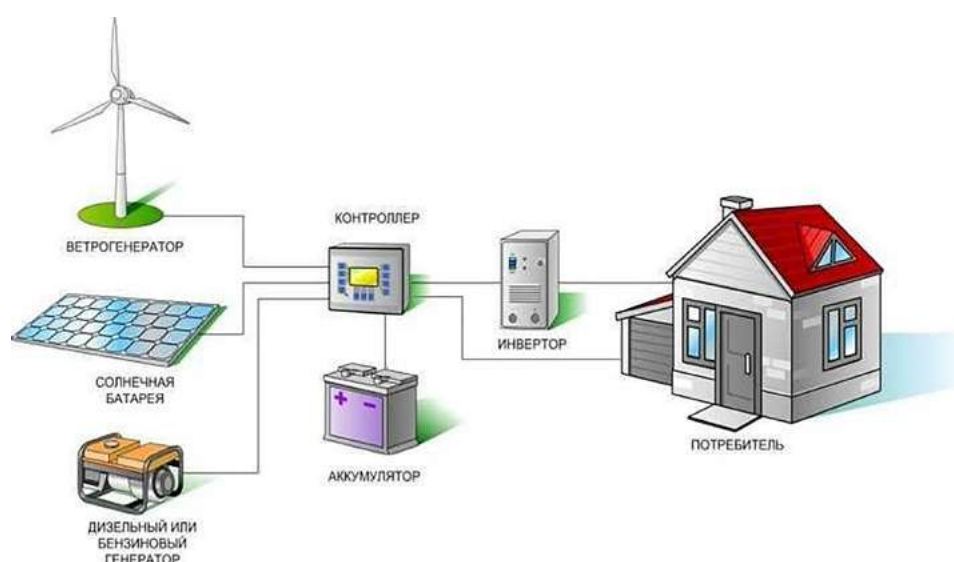


Рис. 5. Структурная схема электростанции

физиологические или психологические эффекты. Исследование, проведенное на трех английских ветроэнергетических станциях, дало аналогичные результаты: шум, производимый современными ветрогенераторами, не может привести к вредным последствиям для здоровья людей, проживающих рядом с ветропарком [12].

### Экономическая составляющая проекта

Стоимость одной электростанции GREEN OPTIMAL 12 кВт составляет 939 800 руб., следовательно, стоимость 34 таких электростанций составит 3 195 320 руб., стоимость монтажа примем в размере 15 % от стоимости оборудования [13, 14], то есть 4 792 980 руб., также учтем необходимость текущего и капитального ремонта, приняв размер ежегодных амортизационных отчислений 20 % от стоимости оборудования на срок в 25 лет (средний срок службы солнечной электростанции), соответственно, суммарные затраты на весь средний срок службы оборудования, включая приобретение оборудования, его монтаж, текущий и капитальный ремонты составят 196 512 180 руб.

Валдай получает электроэнергию непрерывно 24 часа в сутки. Имеется значительная разница спроса на электроэнергию летом и зимой. Это указывает на объем электроэнергии, используемой в данном населенном пункте в целях отопления. Минимальное потребление составляет 80 кВт · ч (1:00 – 6:00) летом и 140 кВт · ч (2:00 – 3:00 и 4:00 – 5:00) зимой. Максимальное потребление составляет 180 кВт · ч (13:00 – 14:00) летом и 340 кВт · ч (17:00 – 18:00, 19:00 – 20:00, 21:00 – 22:00) зимой. Зимой энергопотребление в среднем стабильнее, чем летом. Базовая энергонагрузка на систему оценивается в 120 кВт с точностью до 90 % [10].

Так как единственным источником энергии в поселке является дизельный генератор, то стоимость 1 кВт определяется по формуле (1):

$$C = \frac{\pi_d \cdot Q_v}{P_q}, \quad (1)$$

где  $\pi_d$  — средняя цена дизельного топлива, примем равной 54 руб/л;

$Q_v$  — расход топлива 75 %, равный 67,85 литра за час, для Cummins C500D5;

$P_q$  — средняя вырабатываемая мощность за час 120 кВт.

$$C = \frac{54 \cdot 67,85}{120} = 30,53 (\text{руб/кВт} \cdot \text{ч}).$$

При переходе на солнечно-ветряную энергию исключается необходимость постоянной закупки дизельного топлива, которое будет иметься в наличии на случай необходимости включения резервного дизель-генератора. В Валдае имеется 2 емкости общим объемом в 80 м<sup>3</sup> ~ 80 000 л [10]. Ежегодная экономия электроэнергии за год определяется по формуле (2).

$$\mathcal{E}_n = P \cdot C - \pi_d \cdot 2 \cdot 80\,000,$$

где  $\mathcal{E}_n$  — экономия электроэнергии за год, руб.;

$P$  — выработка электроэнергии за год

(1 535 229 кВт · ч) [10];

$C$  — стоимость 1 кВт, руб/кВт · ч;

$\pi_d$  — средняя цена дизельного топлива, примем равной 54 руб/л;

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_n &= 1\,535\,229 \cdot 30,53 - 54 \cdot 2 \cdot 80\,000 = \\ &= 37\,416\,870, \text{ руб.} \end{aligned}$$

Экономия за весь срок службы солнечной электростанции рассчитывается по формуле (3):

$$\Sigma \mathcal{E}_{1-25} = \mathcal{E}_n \cdot 25, \quad (3)$$

где 25 — средний срок службы солнечной электростанции, лет;

$$\Sigma \mathcal{E}_{1-25} = 37\,416\,870 \cdot 25 = 935\,421\,750, \text{ руб.}$$

Срок окупаемости инвестиций — период, необходимый для возмещения средств, инвестированных в проект. Он рассчитывается по формуле (4):

$$T_{\text{ок}} = \frac{И}{\Xi}, \quad (4)$$

где И — инвестиции в проект (196 512 180 руб.).

$$T_{\text{ок}} = \frac{196\,512\,180}{37\,416\,870} = 5,25, \text{ года.}$$

## Заключение

Таким образом, в статье была рассмотрена эффективность перспективы внедрения альтернативных источников энергии в качестве основных энергоресурсов для малых отдаленных от единой энергетической системы населенных пунктов. На примере Валдайского сельского поселения Сегежского района Республики Карелии выбран вариант применения комбинированной системы, состоящей из двух видов альтернативных источников, — солнечных панелей и ветрогенераторов, а также для предупреждения аварийных ситуаций включающей дизель-генератор. Для выбранного варианта проведена экономическая оценка эффективности предлагаемого проекта (с учетом сохранения существующих линий ВЛ 0,4 кВ), на основании которого получен срок окупаемости в 5,25 года, что при нормативном сроке службы оборудования в 25 лет говорит о целесообразности внедрения альтернативных энергосистем в малых отдаленных от единой энергетической системы населенных пунктах в рамках декарбонизации энергетики, поскольку решение глобальных целей экологии начинается с решения малых конкретных задач, опыт которых послужит опорой для эффективного и комплексного решения глобальных задач.

## Библиографический список

1. Официальный сайт Сегежского муниципального района. — URL: [http://home.onego.ru/~segadmin/omsu\\_selo\\_valday.htm](http://home.onego.ru/~segadmin/omsu_selo_valday.htm) (дата обращения: 11.11.2022).
2. Ассоциация «Совет муниципальных образований Республики Карелии». — URL: <https://xn---7sbupjdsxf1p.xn--p1ai/district/valdajskoe-selskoe-poselenie/> (дата обращения: 11.11.2022).
3. Дизельный генератор. — URL: <https://mototech.ru/dizelnye-generatory/cummins-c500d5e/> (дата обращения: 11.11.2022).
4. Постановление Правительства РФ от 29 августа 2020 г. № 1298 «О вопросах стимулирования использования возобновляемых источников энергии, внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и о признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ № 36 от 7 сентября 2020 г., ст. 5617.
5. Вертакова Ю. В. Альтернативная энергетика. Развитие зеленой экономики в энергетике / Ю. В. Вертакова // Энергетическая безопасность: сб. науч. ст. II Междунар. молодежного конгресса. — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. — С. 24–26.
6. Карта климатических поясов России. — URL: <https://www.avangard-sp.ru/services/karta-klimaticheskikh-ro yasov/> (дата обращения: 11.11.2022).
7. ГОСТ Р 54531—2011. Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии. Принят и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 ноября 2011 г. № 610-ст.
8. ГОСТ Р 54418.2—2014 (МЭК 61400-2:2006). Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Принят и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2014 г. № 1686-ст.
9. ГОСТ Р 51597—2000. Нетрадиционная энергетика. Модули солнечные фотоэлектрические. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 21 апреля 2000 г. № 122-ст.
10. Отчет о текущей ситуации в энергоснабжении и возможностях развития возобновляемой энергетики в восьми удаленных населенных пунктах РК. — URL: [https://r1.nubex.ru/s740-6dd/f1052\\_3c/KA535%20Energy%20Supply%20report.pdf](https://r1.nubex.ru/s740-6dd/f1052_3c/KA535%20Energy%20Supply%20report.pdf) (дата обращения: 11.11.2022).



11. Гибридная солнечно-ветровая электростанция. — URL: [https://nadavtomatika.ru/goods/Gibridnaya-solnechno-ventrovaya-jelektrostantsiya-quot-Green-optimal-quot?from=MTQ5&mod\\_id=158508351](https://nadavtomatika.ru/goods/Gibridnaya-solnechno-ventrovaya-jelektrostantsiya-quot-Green-optimal-quot?from=MTQ5&mod_id=158508351) (дата обращения: 11.11.2022).

12. Всемирная организация здравоохранения. — URL: <https://www.who.int/ru> (дата обращения: 11.11.2022).

13. Муравьева Н. П. Организация работы и управление подразделением организации / Н. П. Муравьева // Методические указания. — Тверь: ГБП ОУ Тверской технологический колледж, 2019. — 38 с.

14. Постановление Госстроя России от 5 марта 2004 г. № 15/1 (ред. от 16 июня 2014 г.) «Об утверждении и введении в действие Методики определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации».

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 27.02.2023

#### Контактная информация

КЛЮШИНА Арина Витальевна — студент;  
klyshinaarina@yandex.ru

КИПИНА Анастасия Андреевна — студент;  
kipina.01@yandex.ru

ТУМАНОВ Игорь Дмитриевич — студент;  
igor.tumanov.01@mail.ru

ТЕРЁХИН Илья Александрович — канд. техн. наук,  
доц.; terekhin@pgups.ru

БАРАНОВ Иван Александрович — аспирант;  
baranov@pgups.ru

## Electrification of Valdai Village Through the Use of Alternative Renewable Energy Sources

A. V. Klyshina, A. A. Kipina, I. D. Tumanov, I. A. Terekhin, I. A. Baranov

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

**For citation:** Klyshina A. V., Kipina A. A., Tumanov I. D., Terekhin I. A., Baranov I. A. Electrification of Valdai Village Through the Use of Alternative Renewable Energy Sources // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 222–230. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-222-230

### Summary

**Purpose:** To conduct a study on the electrification of a remote small village in the frames of energy decarbonization with renewable energy sources. **Methods:** Analysis of small village current electrification, normative documents and statistics, pursuing economic calculations on the made analysis basis. **Results:** The choice from the most spread options of alternative electrification in favor of solar-wind power plants was made. Economic assessment of electrification proposed option was made in the frames of energetics decarbonization which as result of, the value of necessary investments as well as project payback period which basis on, it is possible to judge on the project economic efficiency. **Practical significance:** The effectiveness of alternative energy introduction in small settlements, remote from unified energetic system, is shown.

**Keywords:** Green energy, alternative energy, wind energy, solar energy, electrification, decarbonization.

### References

1. *Oficial'nyj sajт Segezhskego municipal'nogo rajona* [Official website of Segezha Municipal District]. Available at: [http://home.onego.ru/~segadmin/omsu\\_selo\\_valday.htm](http://home.onego.ru/~segadmin/omsu_selo_valday.htm) (accessed: November 11, 2022). (In Russian)

2. *Assotsiatsiya "Sovet munitsipal'nykh obrazovaniy Respubliki Karelii"* [Association "Council of Municipalities of the Republic of Karelia"]. Available at: <https://xn----7sbupjdxsf1p.xn--p1ai/district/valdajskoe-selskoe-poselenie/> (accessed: November 11, 2022). (In Russian)

3. *Dizel'nyj generator* [Diesel generator]. Available at: <https://mototech.ru/dizelnye-generatory/cummins-c500d5e/> (accessed: November 11, 2022). (In Russian)

4. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 29 avgusta 2020 g. № 1298 “O voprosakh stimulirovaniya ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii, vnesenii izmeneniy v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii i o priznanii utrativshimi silu otdel'nykh polozheniy nekotorykh aktov Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii” [Decree of the Government of the Russian Federation of August 29, 2020 № 1298 “On issues of stimulating the use of renewable energy sources, amending certain acts of the Government of the Russian Federation and recognizing certain provisions of certain acts of the Government of the Russian Federation as invalid”]. *Sobranie zakonodatel'stva RF № 36 ot 7 sentyabrya 2020 g., St. 5617* [Collection of Legislation of the Russian Federation № 36 dated September 7, 2020, Art. 5617]. (In Russian)

5. Vertakova Y. V. *Al'ternativnaya energetika. Razvitie zelenoy ekonomiki v energetike. Energeticheskaya bezopasnost': sb. nauch. St. II Mezhdunar. molodezhnogo kongressa* [Alternative energy. Development of green economy in the energy sector. Energy security: coll. scientific Art. II Intern. youth congress]. Kursk: ZAO “Universitetskaya kniga” Publ., 2017, pp. 24–26. (In Russian)

6. *Karta klimaticheskikh poyasov Rossii* [Map of climatic zones of Russia]. Available at: <https://www.avangard-sp.ru/services/karta-klimaticheskikh-poyasov/> (accessed: November 11, 2022). (In Russian)

7. GOST R 54531—2011. *Netradicionnye tekhnologii. Vozobnovlyaemye i al'ternativnye istochniki energii. Prinyat i vvedyon v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 28 noyabrya 2011 g. № 610-St.* [GOST R 54531—2011. Unconventional technologies. Renewable and alternative energy sources. Adopted and enacted by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 28, 2011 № 610-st.]. (In Russian)

8. GOST R 54418.2—2014 (MEK 61400-2:2006). *Vozobnovlyaemaya energetika. Vetroenergetika. Ustanovki vetroenergeticheskie. Prinyat i vvedyon v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 19 noyabrya 2014 g. № 1686-St.* [GOST R 54418.2—2014 (IEC 61400-2:2006). Renewable Energy. Wind energy. Wind power installations. Adopted and put into effect by Order No. 1686-st of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of November 19, 2014]. (In Russian)

9. GOST R 51597—2000. *Netradicionnaya energetika. Moduli solnechnye fotoelektricheskie. Prinyat i vvedyon v*

*dejstvie postanovleniem Gosstandarta Rossii ot 21 aprelya 2000 g. № 122-St.* [GOST R 51597—2000. Non-traditional Energy. Solar photovoltaic modules. Adopted and put into effect by Decree of the State Standard of Russia № 122-st dated November 28, 2011]. (In Russian)

10. *Otchet o tekushchej situatsii v energosnabzhenii i vozmozhnostyah razvitiya vozobnovlyaemoj energetiki v vos'mi udalennykh naselednykh punktah RK* [Report on the current situation in energy supply and opportunities for renewable energy development in eight remote settlements of the Karelia Republic]. Available at: [https://r1.nubex.ru/s740-6dd/f1052\\_3c/KA535%20Energy%20Supply%20report.pdf](https://r1.nubex.ru/s740-6dd/f1052_3c/KA535%20Energy%20Supply%20report.pdf) (accessed: November 11, 2022). (In Russian)

11. *Gibridnaya solnechno-vetrovaya elektrostanciya* [Hybrid solar-wind power plant]. Available at: [https://nadavtomatika.ru/goods/Gibridnaya-solnechno-vetrovaya-jelektrostanciya-quot-Green-optimal-quot?from=MTQ5&mod\\_id=158508351](https://nadavtomatika.ru/goods/Gibridnaya-solnechno-vetrovaya-jelektrostanciya-quot-Green-optimal-quot?from=MTQ5&mod_id=158508351) (accessed: November 11, 2022). (In Russian)

12. *Vsemirnaya organizaciya zdavoohraneniya* [World Health Organization]. Available at: <https://www.who.int/ru> (accessed: November 11, 2022). (In Russian)

13. Murav'eva N. P. *Organizaciya raboty i upravlenie podrazdeleniem organizatsii* [Organization and management of the division of the organization]. *Metodicheskie ukazaniya* [Methodological instructions]. Tver': GBP OU Tverskoj tekhnologicheskij kolledzh Publ., 2019, 38 p. (In Russian)

14. *Postanovlenie Gosstroya Rossii ot 5 marta 2004 g. № 15/1 (red. ot 16 iyunya 2014 g.) “Ob utverzhdenii i vvedenii v dejstvie Metodiki opredeleniya stoimosti stroitel'noy produktsii na territorii Rossiyskoy Federatsii”* [Decree of the Gosstroy of Russia dated March 5, 2004 № 15/1 (as amended on June 16, 2014) “On the approval and implementation of the Methodology for determining the cost of construction products on the territory of the Russian Federation”]. (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 27, 2023

#### Author's information:

Arina V. KLYSHINA — Student; [klyshinaarina@yandex.ru](mailto:klyshinaarina@yandex.ru)

Anastasia A. KIPINA — Student; [kipina.01@yandex.ru](mailto:kipina.01@yandex.ru)

Igor D. TUMANOV — Student; [igor.tumanov.01@mail.ru](mailto:igor.tumanov.01@mail.ru)

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; [terekhin@pgups.ru](mailto:terekhin@pgups.ru)

Ivan A. BARANOV — Postgraduate Student; [baranov@pgups.ru](mailto:baranov@pgups.ru)

УДК 725.35:004.94

## Оценка влияния внутренних факторов на потребное число приемоотправочных путей технических станций

Д. Е. Богданович<sup>1</sup>, С. В. Богданович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Мосгипротранс», Российская Федерация, 129626, Москва, ул. Павла Корчагина, 2

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

**Для цитирования:** Богданович Д. Е., Богданович С. В. Оценка влияния внутренних факторов на потребное число приемоотправочных путей технических станций // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 231–238. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-231-238

### Аннотация

**Цель:** Рассмотреть влияние продолжительности элемента времени ожидания выполнения операций по смене локомотива и локомотивной бригады у транзитных поездов без переработки, прибывающих на техническую станцию, на потребное число приемоотправочных путей. В имитационной модели проводится сравнение базового варианта и вариантов, учитывающих введение вышеприведенных факторов. Основной целью проведения имитационных экспериментов является нахождение потребного числа приемоотправочных путей в транзитных парках технических станций при различных вариациях исходных данных. Посредством модели определяются следующие основные показатели, на основании которых выполняется сравнение полученных вариантов: количество пропущенных поездов; загрузка приемоотправочных путей (%); продолжительность занятия путей за сутки под различными операциями. **Методы:** Использование основных принципов и методов имитационного моделирования для оценки влияния моделируемых факторов на потребное число приемоотправочных путей. **Результаты:** Полученные результаты свидетельствуют об адекватности предложенной имитационной модели для оценки влияния внутренних факторов на потребное число приемоотправочных путей, что подтверждается полученными результатами. **Практическая значимость:** Полученные результаты можно использовать при разработке рекомендаций по корректировке существующих норм проектирования.

**Ключевые слова:** Железнодорожная станция, путевое развитие, имитационная модель, приемоотправочные пути.

Имитационное моделирование является одним из наиболее точных методов, применяемых при расчетах технико-технологических параметров работы транспортных объектов, имеющих сложную структурную конфигурацию [1]. К таким объектам относятся технические станции — участковые и сортировочные. Сложность расчетов увеличивается в случае, если данные станции, в частности участковые, являются стыковыми разных видов тока или границами гарантийных

участков обслуживания. В данном случае обязательно выполняются технологические операции по смене локомотива или локомотивной бригады и проведении технического обслуживания.

В текущих условиях развития техники и технологий известно, что наиболее перспективным направлением является применение полигонных технологий. Они дают возможность (при использовании современных тяговых средств — электровозов серий 3ЭС10 «Гранит», 2ЭС6 «Синара»,

ЗЭС5К «Ермак», доля которых за последние 5 лет возросла с 25 до 40 %) водить не только поезда повышенной массы и соединенных, но и увеличить протяженность участков обращения локомотивов, а также увеличить протяженность плеч работы локомотивных бригад. Помимо этого, установленные гарантийные участки повышенной протяженности (до 2300 км — для серийных груженых вагонов, до 3300 км — для серийных порожних вагонов, до 4000 км — для ускоренных контейнерных поездов, до 6000 км — для инновационных вагонов) дают возможность сократить, но не исключить число остановок транзитных грузовых поездов для проведения технического обслуживания. Кроме того, технические станции являются структурным элементом в логистической цепи доставки грузов, и оптимизация времени нахождения транзитного поезда по операциям смены локомотива или локомотивной бригады также является актуальной задачей [2, 3]. Несмотря на наличие данных преимуществ развития перевозочного процесса, на технических станциях продолжает остро стоять проблема наличия и емкости приемоотправочных путей [4–6].

Таким образом, необходимость исследования влияния внешних и внутренних условий на ритмичность работы станций по переработке транзитного поездопотока остается актуальной [7, 8]. Кроме того, имитационное моделирование дает возможность актуализировать и дать возможность внести коррективы в действующие нормы расчета путевого развития железнодорожных станций [9, 10].

Для оценки влияния технико-технологических параметров выполнено имитационное моделирование по определению требуемого числа приемоотправочных путей в зависимости от расчетного числа грузовых поездов в сутки при следующих условиях:

- отсутствии влияния внешних или внутренних факторов, влияющих на задержки поездов в ожидании выполнения операций;

- влиянии факторов (наличие технологических «окон», задержки в ожидании выполнения операций по смене локомотивной бригады или локомотива).

Расчеты в имитационной модели выполняются последовательно, т. е. при последовательном увеличении размеров грузового движения при выбранном количестве приемоотправочных путей. После определения максимально возможных размеров грузового движения выполняются дополнительные эксперименты для определения влияния различных факторов на количество приемоотправочных путей. Расчеты проводились для приемоотправочных парков участковых станций.

Также вводится понятие «период приемоотправочного парка» — это минимальное время занятия пути одним поездом или минимальная продолжительность обработки транзитного поезда согласно данным типового технологического процесса работы сортировочной (участковой) станции [11, 12]. Таким образом, максимальное число поездов, которое поступит в парк за данный период времени, будет являться потребным числом приемоотправочных путей в данном парке. На рис. 1 представлены результаты имитационного моделирования требуемого числа приемоотправочных путей при смене локомотива (рис. 1, а) и смене локомотивной бригады (рис. 1, б) в «идеальных условиях» (при отсутствии влияния внешних и внутренних факторов). Это так называемый базовый вариант, т. е. вариант, когда отсутствуют внешние факторы, влияющие на длительность нахождения поезда под обработкой в приемоотправочном парке.

Результаты расчетов показали, что расчетное число путей имеет прямо пропорциональную зависимость от числа грузовых поездов, поступающих на станцию, и длительности их обработки. При этом наибольшее число поездов, поступающих за период, равный продолжительности тех-

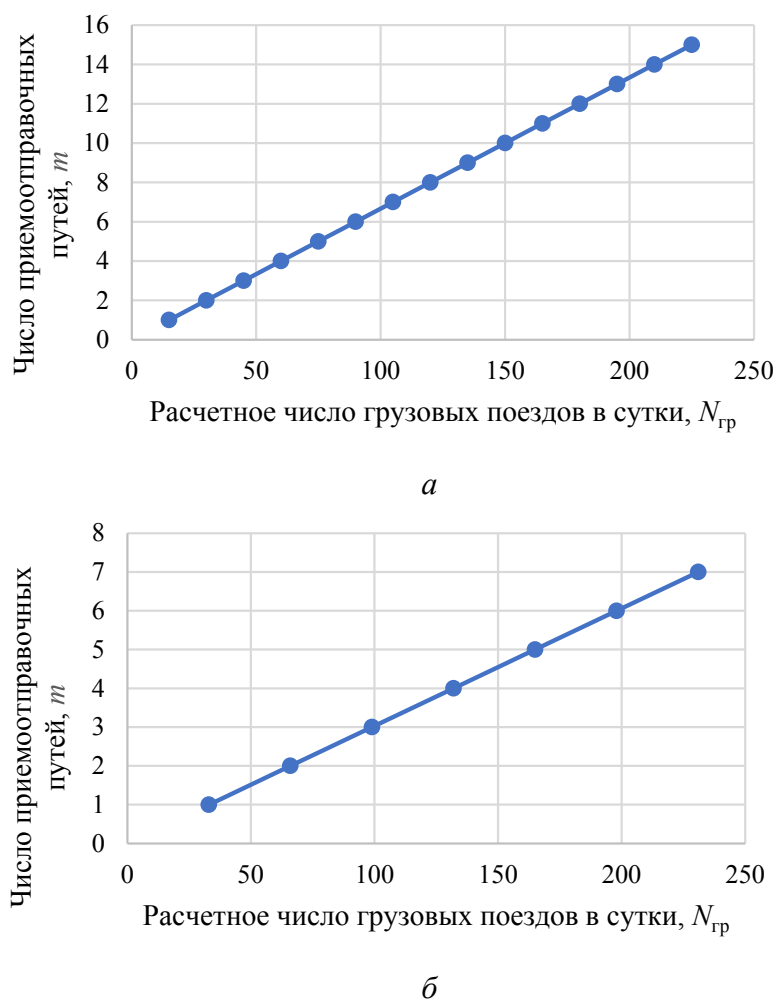


Рис. 1. Зависимость потребного числа приемоотправочных путей от расчетного числа грузовых поездов (базовый вариант):  
 а — смена локомотива; б — смена локомотивной бригады

нического обслуживания, будет определять число приемоотправочных путей в парке.

Для оценки влияния внешних факторов на число приемоотправочных путей были проведены эксперименты при введении в имитационную модель технологических «окон» продолжительностью 75 и 150 мин (соответственно при примыкании однопутного и двухпутного перегона). На рис. 2 в качестве примера приведены полученные результаты моделирования для технологического «окна» 75 мин.

При сравнении с базовым вариантом установлено, что интервал прибытия грузовых поездов в парк снижается и, как следствие, ведет к

недостатку приемоотправочных путей при расчетных размерах движения. Например, в случае смены локомотива расчетное число путей снижается на 1 при продолжительности технологического «окна» 75 мин, на 2 — при продолжительности технологического «окна» 150 мин при тех же размерах движения, что в базовом варианте.

При моделировании данного варианта для оценки влияния продолжительности ожидания выполнения смены локомотива и локомотивной бригады в имитационной модели выполняется генерация случайных чисел времени ожидания. Продолжительность времени ожидания локомо-

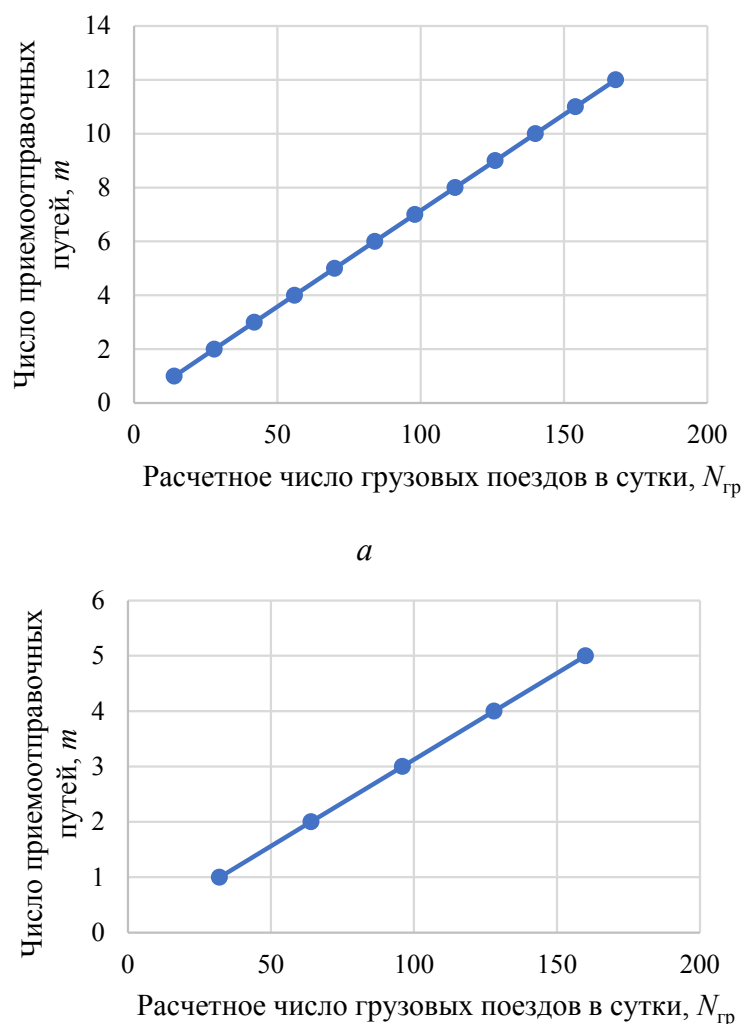
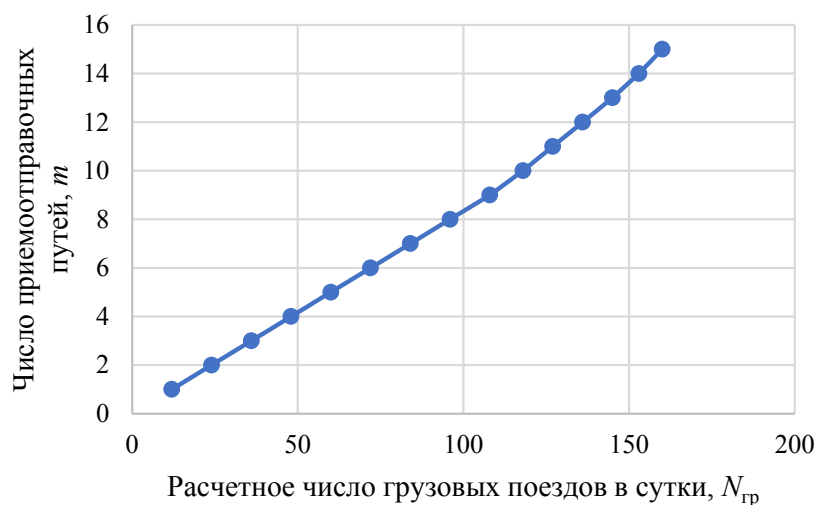


Рис. 2. Зависимость числа приемоотправочных путей от расчетного числа грузовых поездов при продолжительности технологического «окна» 75 мин:  
 а — смена локомотива; б — смена локомотивной бригады

тива или локомотивной бригады, предлагается определять как математическое ожидание от переменных  $k$  и  $\lambda$ , распределенных по закону Эрланга (гамма-распределение). Эксперимент проводился для следующих вариантов: при смене локомотива — продолжительность ожидания распределяется по закону Эрланга при  $k = 1$  и  $\lambda = 0,05$  (математическое ожидание составляет 20 мин), при  $k = 2$  и  $\lambda = 0,05$  (математическое ожидание составляет 40 мин); при смене локомотивной бригады — продолжительность ожидания распределяется по закону Эрланга при  $k = 1$  и  $\lambda = 0,1$  (математическое ожидание состав-

ляет 10 мин), при  $k = 1$  и  $\lambda = 0,05$  (математическое ожидание составляет 20 мин). На рис. 3 представлены результаты расчетов.

Как следует из результатов моделирования, при ожидании смены локомотивов (локомотивных бригад) необходимое количество путей по сравнению с предыдущим экспериментом увеличивается. При поступлении в парк более 100 грузовых поездов возникает экспоненциальный рост в потребности путей. Это связано с более широким распределением продолжительности ожидания локомотивов (локомотивных бригад).



а



б

Рис. 3. Зависимость числа приемоотправочных путей от расчетного числа грузовых поездов, поступающих в парк, с параметрами  $k = 1$  и  $\lambda = 0,05$ :

а — ожидание смены локомотива; б — ожидание смены локомотивной бригады

В имитационной модели может быть проведена оценка влияния пассажирского движения, пригородного движения в часы пик, числа бригад ПТО. Полученные результаты моделирования показали эффективность имитационной модели для оценки влияния указанных факторов и дают возможность определить расчетное число приемоотправочных путей при воздействии заданных факторов.

### Заключение

Таким образом, было установлено:

– разработанная имитационная модель показала эффективность в оценке влияния внутренних факторов на потребное число приемоотправочных путей технической станции при переработке транзитного поездопотока со сменой локомотива или локомотивной бригады;

– результаты, получаемые в процессе моделирования, могут учитываться в оперативном планировании и диспетчерском регулировании поездопотоками на полигоне для сокращения времени ожидания выполнения технологических операций;

– полученные результаты возможно использовать при разработке рекомендаций по корректировке существующих норм проектирования путевого развития технических станций.

### Библиографический список

1. Тимченко В. С. Эволюция имитационных моделей железнодорожных участков: от оценки пропускной способности к максимальным размерам движения / В. С. Тимченко, В. В. Костенко, Д. Е. Богданович // Вестник транспорта Поволжья. — 2019. — № 3(75). — С. 75–80.
2. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.
3. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций / О. Д. Покровская // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 2(38). — С. 68–76.
4. Мишарин А. С. Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры / А. С. Мишарин, П. А. Козлов // Железнодорожный транспорт. — 2014. — № 4. — С. 52–54.
5. Косенко С. А. Проектирование путевого развития станций и выбор конструкций верхнего строения пути для тяжеловесного движения поездов / С. А. Косенко, С. В. Богданович, С. С. Акимов // Вестн. Сибирск. гос. ун-та путей сообщения. — 2018. — № 4(47). — С. 21–29.
6. Akimov S. Stability of the supporting subgrade on the tracks with heavy train movement. Advances in intelligent systems and computing / S. Akimov, S. Kosenko, S. Bogdanovich // VIII International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. — Novosibirsk: Siberian State Transport University, 2020. — Pp. 228–236.
7. Козлов П. А. Об имитационном моделировании и имитационных системах / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Е. В. Копылова // Транспорт Урала. — 2019. — № 1(60). — С. 3–6.
8. Козлов П. А. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с помощью имитационного моделирования / П. А. Козлов, О. В. Осокин, В. С. Колокольников // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 6. — С. 12–16.
9. Костенко В. В. Практическое применение цифровой модели для технико-экономического обоснования реконструкции железнодорожной станции / В. В. Костенко, Д. Е. Богданович // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 1. — С. 61–73.
10. Костенко В. В. О внесении изменений в расчетные формулы потребного числа приемоотправочных путей в парках технических станций / В. В. Костенко, Д. Е. Богданович // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 1. — С. 16–24.
11. Типовой технологический процесс работы сортировочной станции ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». — М., 2015. — 374 с.
12. Типовой технологический процесс работы участковой станции ОАО «РЖД» / ОАО «РЖД». — М., 2016. — 178 с.

Дата поступления: 07.02.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

### Контактная информация:

БОГДАНОВИЧ Данила Евгеньевич — инженер; bogdan\_danila@inbox.ru

БОГДАНОВИЧ Светлана Васильевна —

канд. техн. наук, доц.;

s.v.bogdanovich@mail.ru



## Assessment of Internal Factors Influence on the Required Number of Receiving Ways at Technical Stations

D. E. Bogdanovich<sup>1</sup>, S. V. Bogdanovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Mosgioprotrans», 2, Pavel Korchagin str., Moscow, 129626, Russian Federation

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

**For citation:** Bogdanovich D. E., Bogdanovich S. V. Assessment of Internal Factors Influence on the Required Number of Receiving Ways at Technical Stations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 231–238. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-231-238

### Summary

**Purpose:** To consider the duration effect of waiting time element for to perform operations on locomotive and locomotive crew change for transit trains without processing which arrive at the technical station on the required number of receiving tracks. In the simulation model, comparison of basic variant and the variants counting the introduction of the above factors is carried out. The main purpose of holding simulation experiments is to find receiving route required number in transit parks of technical stations at various variations of initial data. By means of the model, the following main indicators are determined which basis on, there're compared the obtained options: missed train number; receiving tracks load (%); track occupation duration per day under various operations. **Methods:** The use of basic principles and simulation modeling methods to assess the impact of being simulated factors on receiving track required number. **Results:** The obtained results indicate proposed simulation model adequacy for assessing internal factor influence on receiving-forwarding track required number that's confirmed by the obtained results. **Practical significance:** The obtained results can be used in recommendation development for the adjustment of existing planning standards.

**Keywords:** Railway station, track development, simulation model, receiving-forwarding tracks.

### References

1. Timchenko V. S., Kostenko V. V., Bogdanovich D. E. Evolyuciya imitacionnyh modelej zheleznodorozhnyh uchastkov: ot ocenki propusknnoj sposobnosti k maksimal'nyim razmeram dvizheniya [Evolution of railway section simulation models: from estimating traffic capacity to maximum traffic volumes]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Transport Bulletin of the Volga region], 2019, Iss. 3(75), pp. 75–80. (In Russian)
2. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozok v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure in Russian coal transportation industry]. *Innovatsionnyy transport* [Innotrans]. 2015, Iss. 1(15), pp. 13–23. (In Russian)
3. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaya klassnost' zheleznodorozhnykh stantsiy [Logistic rating of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2018, Iss. 2(38), pp 68–76. (In Russian)
4. Misharin A. S., Kozlov P. A. Imitacionnaya ekspertiza proektov razvitiya transportnoj infrastruktury [Simulation examination of transport infrastructure development projects]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2014, Iss. 4, pp. 52–54. (In Russian)
5. Kosenko S. A., Bogdanovich S. V., Akimov S. S. Proektirovanie putevogo razvitiya stancij i vybor konstrukcij verhnego stroeniya puti dlya tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov [Station track design and selection of the track superstructure

for heavy train traffic]. *Vestn. Sibirsk. gos. un-ta putey soobshcheniya* [Vestnik of Siberian State Transport University]. 2018, Iss. 4 (47), pp. 21–29. (In Russian)

6. Akimov S., Kosenko S., Bogdanovich S. Stability of the supporting subgrade on the tracks with heavy train movement. *Advances in intelligent systems and computing. VIII International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia*. Novosibirsk: Siberian State Transport University, 2020, pp. 228–236.

7. Kozlov P. A., Kolokol'nikov V. S., Kopylova E. V. Ob imitacionnom modelirovanii i imitacionnyh sistemah [On simulation modeling and simulation systems]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, Iss. 1(60), pp. 3–6. (In Russian)

8. Kozlov P. A., Osokin O. V., Kolokol'nikov V. S. Issledovanie proektov razvitiya zheleznodorozhnykh stantsij i polygonov s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya [Study of railway stations and landfills development projects using simulation modeling]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway Transport], 2018, Iss. 6, pp. 12–16. (In Russian)

9. Kostenko V. V., Bogdanovich D. E. Prakticheskoe primeneniye tsifrovoy modeli dlya tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya rekonstruktsii zheleznodorozhnoy stantsii [Practical application of a digital model for a railway station reconstruction feasibility study]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2021, Iss. 1, pp. 61–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-61-73. (In Russian)

10. Kostenko V. V., Bogdanovich D. E. O vnesenii izmeneniy v raschetnye formuly potrebnogo chisla priemootpravochnykh putey v parkakh tekhnicheskikh stantsiy [On amendments to the calculation formulas for the required number of receiving and departure tracks in the technical station yards]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 1, pp. 16–24. (In Russian)

11. *Tipovoy tekhnologicheskii protsess raboty sortirovochnoy stantsii OAO "RZhD"* [Typical technological process of the sorting station of JSC "Russian Railways"]. OAO "RZhD" [JSC "Russian Railways"]. Moscow, 2015, 374 p. (In Russian)

12. *Tipovoy tekhnologicheskii protsess raboty uchastkovoy stantsii OAO "RZhD"* [Typical technological process of the work of the local station of JSC "Russian Railways"]. OAO "RZhD" [JSC "Russian Railways"]. Moscow, 2016, 178 p. (In Russian)

Received: February 07, 2023

Accepted: February 28, 2023

#### Author's information:

Danila E. BOGDANOVICH — Leading Engineer;  
bogdan\_danila@inbox.ru

Svetlana V. BOGDANOVICH — PhD in Engineering,  
Associate Professor; s.v.bogdanovich@mail.ru

УДК 625.721

## Концептуальные основы методологии проектирования автодорожной транспортной системы

П. А. Пегин, Д. М. Немчинов, А. А. Ильин

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

**Для цитирования:** Пегин П. А., Немчинов Д. М., Ильин А. А. Концептуальные основы методологии проектирования автодорожной транспортной системы // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 239–251. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-239-251

### Аннотация

**Цель:** В настоящее время на практике используют различные методологические подходы к построению сетей автомобильных дорог. Наиболее рациональным и перспективным является метод, который можно использовать при решении задач развития региона с учетом его транспортного обслуживания. Необходимо рассмотреть методы проектирования и предложить новый или внести изменения в существующие с учетом целей и задач проектирования. **Методы:** Анализ и обобщение результатов о существующей транспортной системе страны. Классификация по определенным признакам с целью разработки порядка выбора метода планирования сети автомобильных дорог. **Результаты:** Приведенный анализ и обобщение результатов позволяют сформулировать требования к планировке и к уровню разветвленности сетей автомобильных дорог. **Практическая значимость:** На основании анализа и обобщения результатов был разработан подробный алгоритм проектирования сетей автомобильных дорог с учетом уровня хозяйственного развития региона и функционального назначения дорог. Данный алгоритм позволит улучшить и ускорить процесс проектирования сетей автомобильных дорог различного уровня и функционального назначения.

**Ключевые слова:** Единая транспортная система страны, автодорожная транспортная система, сеть автомобильных дорог, сеть дорог регионального значения, система транспортных узлов.

### Введение

Единая транспортная система страны представляет собой сложную многомодальную систему. В отличие от других элементов транспортной системы, сеть автомобильных дорог в связи с наиболее массовым использованием и наименее формализованным управлением потоками, для обеспечения безопасности пользователей и максимальной эффективности передвижений товаров и людей требует построения иерархической структуры. При этом такая иерархическая структура должна обеспечивать функциональное единство сети, создавая усло-

вия передвижения «от дверей до дверей». Соответственно, при планировании развития единой сети автомобильных дорог с функционально разделенными элементами необходимо соблюдать принципы и правила, выполнение которых обеспечивает единство сети.

### Модель сети автомобильных дорог

Автомобильно-дорожная транспортная система, включающая несколько функционально разделенных иерархических уровней [1–11], может быть представлена в виде схемы, отражающей ее вертикальную интеграцию (рис. 1).

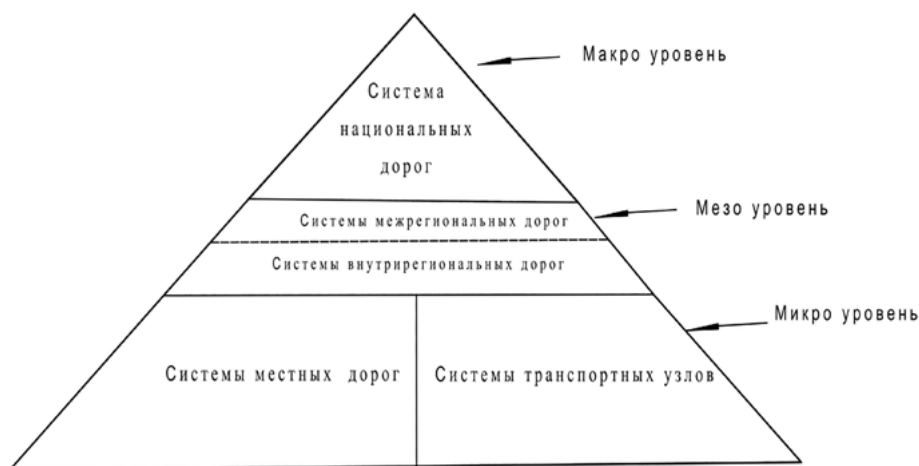


Рис. 1. Интегральная модель единой автодорожной системы страны

Анализ транспортных систем позволяет сформулировать концептуальную модель единой автодорожной системы страны — единой транспортной сети в виде иерархически построенной транспортной системы — в следующей редакции:

1. Базовой основой автодорожной транспортной системы страны является сеть (система) автомобильных дорог высшего — мегауровня — сеть дорог национального значения.

2. Базовая (интермодальная) система дорог дополняется системами дорог мезоуровня — двумя группами мультимодальных автодорожных систем — сетями автомобильных дорог государственного межрегионального и внутрирегионального значения.

3. Проблемы населения сельских территорий решаются системами дорог микроуровня — совокупностью одномодальных автодорожных систем.

Возможность функционирования сетей автомобильных дорог всех уровней и в конечном итоге единой сети автомобильных дорог страны как системы массового обслуживания обеспечивается системой инженерно оборудованных транспортных пересечений (пересечений автомобильных дорог), вид которых зависит от функций пересекающихся дорог.

Состав структурных элементов сети автомобильных дорог, предлагаемый на основе изло-

женных выше соображений и анализа опыта разных стран [1–11], показан на рис. 2 с учетом трех уровней разделения функций каждого уровня иерархии автомобильно-дорожной транспортной системы, представленных на рис. 3.

### Факторы выбора метода планирования элементов сети

Выбор метода планирования представляется целесообразным и важным производить в зависимости от решаемых на каждом иерархическом уровне транспортных задач (рис. 4) с учетом уровня хозяйственного и транспортного развития (региона, группы регионов), численности населения и его расселения по территории.

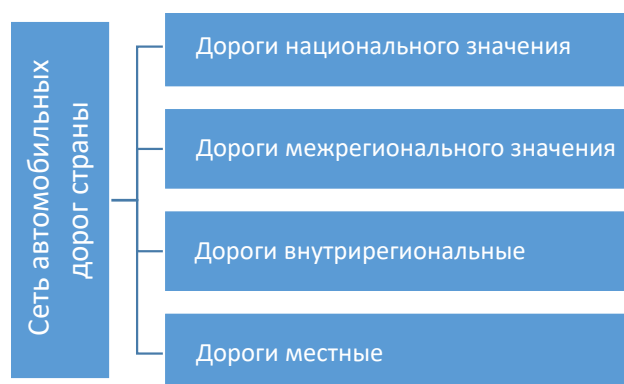


Рис. 2. Состав структурных элементов сети автомобильных дорог

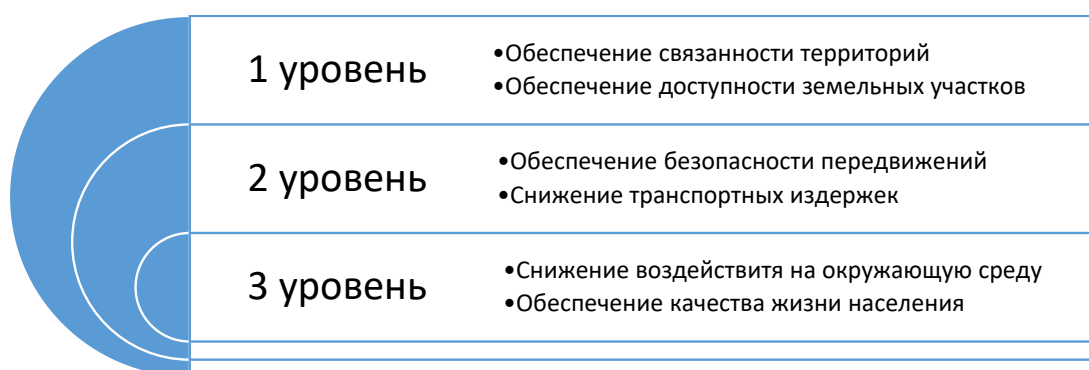


Рис. 3. Уровни разделения функций транспортной системы

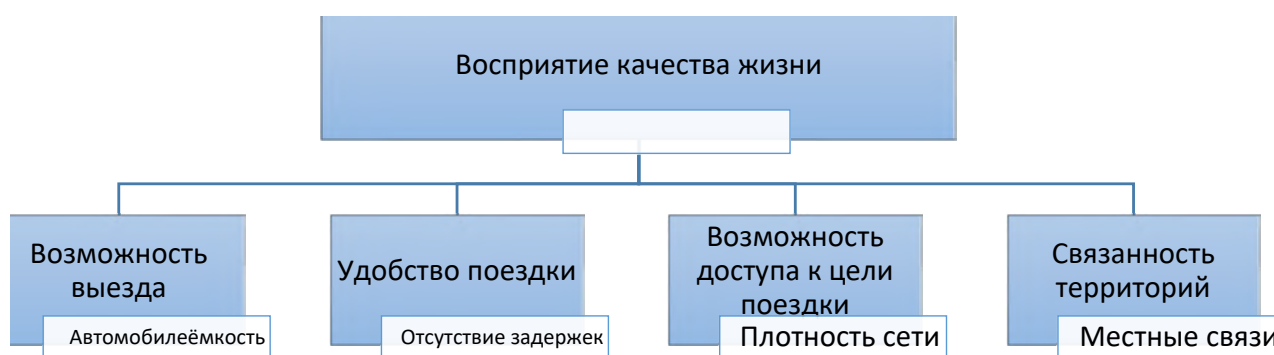


Рис. 4. Задачи, решаемые при планировании развития автотранспортной сети



Рис. 5. Обоснование выбора метода планирования сети

Решение транспортных задач в процессе планирования сети дорог обеспечивает решение задач макро- и микроэкономического развития территории [12–21], укрепления обороны страны и облегчения условий ведения боевых, антитер-

рористических действий «на своей территории» (рис. 5, 6). Во всех случаях важнейшей задачей является улучшение социальных условий жизни и деятельности жителей (населения): повышение уровня жизни, полное обеспечение конституци-



Рис. 6. Содержание факторов выбора метода планирования развития сети дорог



Рис. 7. Требования к автомобильным дорогам с учетом их функционального назначения

онных прав в сфере образования, труда, медицинского обслуживания, отдыха и культуры. Причем чем меньше территория, тем в большей мере меняется приоритет задач: в масштабе страны, группы регионов (иногда отдельных регионов —

в зависимости от их географического положения на карте страны) превалируют проблемы макроэкономики и обороны; в масштабе региона — проблемы микроэкономики (при оказании должного внимания макроэкономике — везде доля разная)

и социальные. Чем меньше размер территории, тем выше приоритет социальных проблем.

Технический уровень дорог разных классов определяется индивидуально, на основе результатов исследований режимов движения автотранспортных потоков и единичных автомобилей, с учетом функции дороги в составе сети [1–11].

### **Выбор метода планирования элементов сети в зависимости от функции дорог**

Проведенный анализ и обобщение позволяют сформулировать требования к сетям автомобильных дорог (к планировке и уровню разветвленности) (рис. 7).

### **Требования к сетям дорог национального (стратегического) и межрегионального значения**

Сети дорог национального и межрегионального значения выполняют функции опорной автодорожной сети страны, обеспечивающей автотранспортный доступ во все регионы и части страны. Национальная сеть выполняет функции дорог стратегического значения. Сеть межрегиональных дорог также выполняет национальные функции, обеспечивая связь соседних регионов (по аналогии с национальной сетью межштатных дорог в США).

Сеть автомобильных дорог национального значения (сеть стратегических дорог) должна обеспечивать экономические, социальные и оборонные транспортные связи со всеми территориями и регионами Российской Федерации.

Сети дорог этих классов должны обеспечивать:

- возможности и потребности интенсивного экономического и социального развития малоосвоенных в экономическом отношении территорий, возможности экономического и оборонного развития неосвоенных территорий, особенно пригодных по природным условиям для благоприятного проживания людей — жителей России;

- возможность движения по нескольким маршрутам одного направления (например, север — юг, восток — запад), удаленным друг от друга на безопасные (в военном отношении) расстояния при максимальном экономическом освоении территорий их проложения.

Дороги сети стратегического значения должны работать в качестве глубоких транспортных коридоров, обеспечивающих быстрый, круглогодичный, бесперебойный, безопасный проезд во все регионы страны. Межрегиональные дороги также должны обеспечивать режим скоростного движения интенсивных транспортных потоков.

Сеть дорог межрегионального значения в сочетании с дорогами национального значения должна обеспечить основные (по важнейшим направлениям) межрегиональные социальные и экономические связи.

Сети дорог должны обеспечивать «многовариантность» подъезда к территориям страны (сеть стратегических дорог), к крупным административным и хозяйственным центрам страны (сети стратегических и межрегиональных дорог), тем самым обеспечивая бесперебойность движения (например, по погодноклиматическим условиям) и антитеррористическую защищенность.

Дороги сети стратегического значения, принимающие значительную часть транспортной работы всей сети автомобильных дорог, должны обеспечивать минимальные задержки движения в целях минимизации выбросов отработавших газов и шумового воздействия.

### **Требования к сетям внутрирегиональных дорог**

Внутрирегиональные — распределительные — дороги должны обеспечивать автотранспортную связь всех административных и достаточно крупных хозяйственных центров региона, а также связи с соседними регионами.



Рис. 8. Обоснование выбора метода планирования сети с учетом функционального назначения дорог

Сеть дорог должна обеспечивать устойчивые связи с соседними регионами по наиболее эффективным в экономическом и социальном плане направлениям. Количество межрегиональных связей должно стимулировать расширение экономического развития соседствующих регионов (коэффициент сети должен быть выше единицы).

Сеть региональных дорог должна обеспечивать круглогодичное бесперебойное и безопасное, комфортное и удобное движение автомобилей. Скорость автомобилей определяется правилами дорожного движения.

### Требования к сетям дорог местного значения

Сеть должна обеспечивать связь всех населенных пунктов между собой, с административными и хозяйственными центрами региона, а также с ближайшими населенными пунктами соседствующих регионов.

Сеть должна обеспечивать тот же уровень безопасности и комфорта движения, что и на

региональных дорогах. Технический уровень дорог местного значения должен соответствовать интенсивности транспортных и пешеходных связей соседних населенных пунктов, особенностям рельефа местности, обеспечивать минимум затрат на строительство и содержание.

Изложенные требования к автомобильным дорогам, входящим в каждый функциональный иерархический уровень, определяют методы планирования и проектирования сети, используемые для каждого уровня сети (рис. 8).

1. Дороги национального значения (стратегические). Проектирование сети дорог осуществляется логическим (экспертным) методом при обязательном выполнении требований: планировка сети должна иметь схему, максимально приближающуюся к прямоугольной или прямоугольно-диагональной, обеспечивая доступ во все регионы страны, «от края до края»; сеть дорог должна обеспечивать возможность движения в одном направлении по нескольким маршрутам, основными направлениями для Российской Федерации являются направления



запад — восток и север — юг; дороги должны размещаться на удалении не более 200–300 км друг от друга для обеспечения возможности маневрирования транспортных потоков и проходить мимо городов; дороги строятся по принципу глубоких — транснациональных (через всю страну) и внутринациональных (в пределах значительной части страны) — транспортных коридоров, обеспечивающих одинаковые условия движения (непрерывность, скорость, безопасность, уровень комфорта, критерием является величина комплексного показателя качества автомобильной дороги /19/) на всем их протяжении; при строительстве сети дорог национального значения нецелесообразно использовать существующую сеть дорог, чтобы не нарушать сложившуюся систему социальных и хозяйственных связей. Технически на некоторых участках дороги национального значения должны обеспечивать возможности решения задач обороны страны. Предполагаемая длина сети дорог национального значения составляет 70–75 тысяч километров.

2. Межрегиональная сеть дорог. Это фактически дополнение и расширение сети дорог национального значения. Межрегиональные дороги решают задачи макроэкономики на уровне регионов. Проектирование сети этих дорог следует проводить в зависимости от уровня хозяйственного и социального развития регионов — экспертным (для хозяйственно мало- или неосвоенных территорий) или аналитическими (для хозяйственно развитых регионов) методами. Основу сети межрегиональных дорог может составить современная (т. е. уже сложившаяся) сеть федеральных дорог, соединяющая все региональные административные центры. Однако многие регионы страны территориально настолько велики, что одна-две межрегиональные дороги не обеспечивают достаточной экономической и социальной связи соседних регионов. Поэтому требуется расширение сети

таких дорог. При этом всегда следует учитывать социальные потребности жителей этих территорий (даже при отсутствии существенных экономических центров). Межрегиональные дороги должны проходить мимо городов, как и дороги стратегические, чтобы не происходило наложение местных и транзитных транспортных потоков (за исключением случаев соединения административных центров регионов). Это не глубокие транспортные коридоры, но дороги скоростного и непрерывного движения. Метод планирования — логический.

3. Сеть внутри региональных дорог. На хозяйственно освоенной части территории Российской Федерации сеть внутри региональных дорог уже в значительной степени создана (длина сети этих дорог достигает 500 тысяч километров). Поэтому требуется лишь реконструкция и частично расширение этой сети. Иное положение дел на мало- или неосвоенных территориях, с малой численностью населения. Здесь стоит задача создания сети внутри региональных дорог. Поэтому предлагается использовать разные методы планирования — в зависимости от уровня социально-экономического развития территории региона и численности населения. В регионах с высоким уровнем социально-экономического развития возможно использовать существующие аналитические (экономико-математические) методы планирования, использующие систему корреспонденций между пунктами отправления и назначения. Однако при этом меняется критерий оценки эффективности работы сети автомобильных дорог: вместо себестоимости перевозок используется новый, более емкий по содержанию и более общий критерий — время передвижения по сети дорог. Для регионов (территориальных частей регионов) с неразвитой хозяйственной и транспортной инфраструктурой, с малочисленным населением используется иная модель, имеющая в основе интересы экономического и соци-

ального развития рассматриваемой территории и предусматривающая определенную этапность развития транспортной инфраструктуры. Ее элементы: выявление на территории мест, представляющих наибольший интерес для государства и региона; выяснение наиболее приемлемого направления хозяйственного использования рассматриваемой территории (промышленное, промышленно-гражданское, рекреационное и т. д.); продолжение на рассматриваемую территорию транспортных коммуникаций соседних территорий (собственного региона и соседних — т. е. обеспечение связи с соседними регионами или с хозяйственно развитой частью своего региона); создание благоприятных условий для жизни, социального и экономического развития будущего населения путем экспертного планирования основной сети внутри региональных дорог, с учетом обеспечения промышленного, сельскохозяйственного, культурно-образовательного, медицинского и рекреационного обеспечения жителей вновь возникающих поселений (городов, сельских населенных пунктов). Первичная сеть внутри региональных дорог по мере хозяйственного развития территории, ее заполнения постоянными жителями возникновения новых поселений постепенно дополняется и расширяется. На этом этапе развитие сети внутри региональных дорог постепенно переходит на экономико-математические методы планирования, приемлемые для хозяйственно развитых территорий. Необходимо отметить, что уже на уровне первичной сети внутри региональных дорог она дополняется сетью местных дорог, связывающих все сельские населенные пункты между собой. Метод планирования — комбинированный: сочетание логического метода с экономико-математическим в требуемой пропорции.

4. Сети местных дорог. Методика их проектирования принципиально отличается от проектирования сетей дорог другого назначения тем, что в данном случае преобладающее значение

имеют социальные запросы населения и задачи микроэкономики. Удовлетворение этих запросов, как правило, не обеспечивает экономическую эффективность строительства дорог. Но эти запросы — основа жизни сельского населения: решение демографических задач, приближение (кое-где и превышение) уровня жизни сельского населения и к уровню жизни городского. Крайне затруднительно сеть местных дорог проектировать и экспертным методом, так как трудно предсказать пожелания направлений поездок местных жителей (у каждого — свои желания). Поэтому при проектировании сети местных дорог целесообразно опираться на исторический опыт создания дорог в сельской местности. Его принцип: все населенные пункты должны быть соединены между собой и по кратчайшим направлениям. Разумеется, с учетом природных условий местности. В России до середины XX века существовала, и даже развивалась, густая сеть местных дорог. Ее плотность, например, для центральной части Европейской территории России достигала 0,344 км/км<sup>2</sup>. Большая часть этих дорог в той или иной степени сохранилась. Поэтому при восстановлении местной сети дорог (речь идет именно о восстановлении сети местных дорог на хозяйственно освоенной территории страны) следует ориентироваться на ранее существующую дорожную сеть, до сих пор фиксируемую на картах местности.

На вновь осваиваемых территориях сеть местных дорог формируется в зависимости от строительства сельских населенных пунктов и их социально-хозяйственной направленности. В этом случае применим и экспертный метод проектирования. Таким образом, проектирование сетей местных дорог должно осуществляться сочетанием метода воспроизведения ранее существовавшей сети дорог, логического метода и экономико-математических методов в соответствующей пропорции.

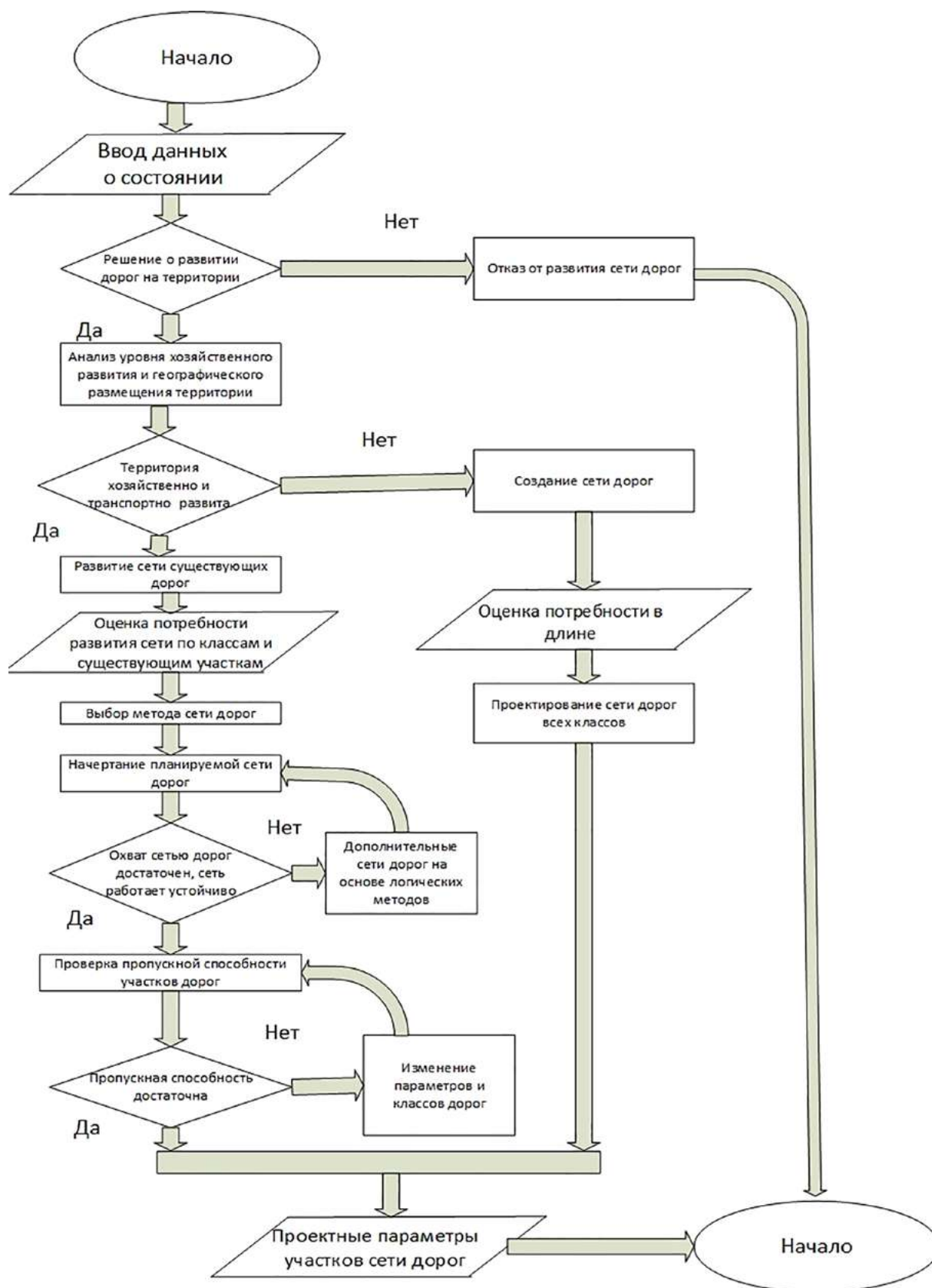


Рис. 9. Алгоритм методологии проектирования сетей автомобильных дорог с учетом уровня хозяйственного развития регионов и функционального назначения дорог.

## Общий порядок планирования развития сети дорог

Изложенное позволяет заключить, что методологию транспортного функционального проектирования сети автомобильных дорог можно представить в виде комплекса моделей, отражающих алгоритмизацию процесса проектирования [20, 21].

Алгоритм методологии проектирования сетей автомобильных дорог с учетом уровня хозяйственного развития регионов и функционального назначения дорог показан на рис. 9.

## Библиографический список

1. Пегин П. А. Математическая модель достаточности сети автомобильных дорог региона / П. А. Пегин, А. А. Ильин, Е. В. Рунев // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020: сборник тезисов. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. — С. 804–807.
2. Пегин П. А. Особенности транспортного планирования сети муниципальных автомобильных дорог с учетом климатических условий / П. А. Пегин, А. А. Ильин // Вестник гражданских инженеров. — 2019. — № 2(73). — С. 131–135.
3. Положение об интегрированной структуре транспортной сети RIN / Научно-исследовательское общество по дорогам и транспорту. — Германия, Кельн, 2008. — 57 с.
4. Скирковский С. В. Разработка алгоритма и компьютерной программы оптимизации параметров функционирования городского маршрутизированного транспорта / С. В. Скирковский, П. А. Пегин // Вестник гражданских инженеров. — 2017. — № 1(60). — С. 277–287.
5. Стремление к нулю: высокие задачи и системный подход к безопасности дорожного движения / Международный транспортный форум, 2008. — 32 с.
6. Патент № 2288986 Российская Федерация, МПК E01C 3/06, E02D 17/18. Конструкция земляного полотна / Ярмолинский А. И., Пегин П. А., Ярмолинский В. А. — 2004.
7. Advancing Sustainable Safety: National Road Safety Outlook for 2005–2020 / SWOV Institute for Road Safety Research, 2006.
8. Arterials and Streets Infrastructure and Operations for Mobility, Access, and Community / Metropolitan Chicago. — Chicago, USA, January, 2009.
9. Assessing the Feasibility of a National Road Classification, Report to ICSM on National Road Classification Developments, The Intergovernmental Committee of Surveying & Mapping (ICSM) formed the Roads Working Group, Australia & New Zealand (RWG) October 2006.
10. 16. Pegin P. Features transport planning the network of municipal roads in northern region / P. Pegin, A. Ilyin, K. Semenova // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Series: Lecture Notes in Civil Engineering. — Singapore, 2020. — Vol. 49. — Pp. 397–401
11. FHWA Urban Boundary and Federal Functional Classification Handbook. Transportation Statistics Office Florida, Department of Transportation Tallahassee. — Florida, 2003.
12. Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures. — 2013. — 70 p.
13. Бугроменко В. Н. Математическое моделирование влияния дорожной сети на себестоимость продукции и социальные показатели регионов / В. Н. Бугроменко. // Труды первого Всероссийского дорожного конгресса. — М.: МАДИ, 2009. — С. 154–157.
14. Василевский Л. И. Транспортная система США: Сравнительный экономический анализ. Соревнование двух систем / Л. И. Василевский. — М.: АН СССР, 1963. — 67 с.
15. Гейдт А. А. Стратегическое планирование развития дорожной инфраструктуры в транспортной политике России: автореф. дисс. ... д-ра экон. наук / А. А. Гейдт. — СПб., 2005. — 273 с.
16. Левитин И. Транспорт как условие экономического роста / И. Левитин // Российская Федерация сегодня. — 2008. — № 9, декабрь. — 13 с.

17. Мороз В. Н. Разработка модели оценки эффективности функционирования региональной транспортной сети. МАТ / В. Н. Мороз, Г. Б. Николаев // Отчет о НИР. — Санкт-Петербург: МАТ, 2002. — 212 с.

18. Немчинов, Д. М. Принципы и методы планирования сетей автомобильных дорог / Д. М. Немчинов. — М.: ТЕХПОЛИГРАФЦЕНТР, 2014. — 199 с.

19. Подопригора Н. В. Информационные аспекты системы «участник дорожного движения — транспортное средство — дорога — внешняя среда» / Н. В. Подопригора, П. А. Пегин, С. Н. Доценко // Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XVI Международной научно-практической конференции. — Оренбург, 2021. — С. 395–402.

20. Пегин П. А. Повышение эффективности и безопасности эксплуатации автомобильного транспорта на основе увеличения пропускной способности автомагистралей:

дисс. ... д-ра техн. наук / П. А. Пегин. — Орел: Орловский государственный технический университет, 2011.

21. Пегин П. А. Анализ внешних и внутренних факторов, влияющих на эффективность деятельности транспортного предприятия / П. А. Пегин, В. К. Цуцкарев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 1. — С. 22–32.

Дата поступления: 05.02.2023

Решение о публикации: 25.02.2023

#### Контактная информация:

ПЕГИН Павел Анатольевич — д-р техн. наук, проф.;  
ppavel.khv@gmail.com

НЕМЧИНОВ Дмитрий Михайлович — соискатель

ИЛЬИН Алексей Анатольевич — ст. преподаватель;  
ilin@pgups.ru

## Conceptual Foundations of Projection Methodology for Road Transport System

P. A. Pegin, D. M. Nemchinov, A. A. Ilyin

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

**For citation:** Pegin P. A., Nemchinov D. M., Ilyin A. A. Conceptual Foundations of Projection Methodology for Road Transport System // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 239–251. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-239-251

### Summary

**Purpose:** Currently, various methodological approaches to the construction of road networks are used in practice. The most rational and promising method is that can be used to solve the problems of region development given its transport services. It is necessary to consider projection methods and propose a new one or to make changes into existing ones taking into account projection goals and tasks. **Methods:** Analysis and generalization of results on the existing transport system of the country. Classification by certain characteristics with the purpose to develop order for choosing planning method for road transport network. **Results:** Given analysis and result generalization allow us to formulate requirements for layout and branching level of road transport networks. **Practical significance:** Based on the analysis and result generalization, detailed algorithm for road transport network projection was developed taking into account regional economic development level and road functional purpose. This algorithm will improve and speed up projection process for road transport networks of various levels and functional purposes.

**Keywords:** Unified transport system of the country, road transport system, road transport network, regional significance road network, transport hub system.

## References

1. Pegin P. A., Il'in A. A., Runov Ye. V. *Matematicheskaya model' dostatochnosti seti avtomobil'nykh dorog regiona* [Mathematical model of the sufficiency of the regional road network]. *Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki: IPDME-2020: sbornik tezisev* [Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics: IPDME-2020: collection of abstracts]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2020, pp. 804–807. (In Russian)
2. Pegin P. A., Il'in A. A. *Osobennosti transportnogo planirovaniya seti munitsipal'nykh avtomobil'nykh dorog s uchetom klimaticheskikh usloviy* [Peculiarities of transport planning of the network of municipal highways taking into account climatic conditions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2019, Iss. 2(73), pp. 131–135. (In Russian)
3. *Polozhenie ob integrirovannoy strukture transportnoy seti RIN. Nauchno-issledovatel'skoe obshchestvo po dorogam i transport* [Regulations on the integrated structure of the transport network RIN. Research Society for Roads and Transport]. Germany, Cologne, 2008, 57 p. (In Russian)
4. Skirkovskiy S. V., Pegin P. A. *Razrabotka algoritma i komp'yuternoy programmy optimizatsii parametrov funktsionirovaniya gorodskogo marshrutizirovannogo transporta* [Development of an algorithm and a computer program for optimizing the parameters of the functioning of urban routed transport]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2017, Iss. 1(60), pp. 277–287. (In Russian)
5. *Stremeniye k nulyu: vysokiye zadachi i sistemnyy podkhod k bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. Mezhdunarodnyy transportnyy forum* [Striving for zero: high goals and a systematic approach to road safety. International Transport Forum]. 2008, 32 p. (In Russian)
6. Yarmolinskiy A. I., Pegin P. A., Yarmolinskiy V. A., *Konstruktsiya zemlyanogo polotna* [Subgrade construction]. Patent RF, no. 2288986, 2006. (In Russian)
7. *Advancing Sustainable Safety: National Road Safety Outlook for 2005–2020*. SWOV Institute for Road Safety Research, 2006.
8. *Arterials and Streets Infrastructure and Operations for Mobility, Access, and Community*. Metropolitan Chicago. Chicago, USA, January 2009.
9. *Assessing the Feasibility of a National Road Classification*, Report to ICSM on National Road Classification Developments, The Intergovernmental Committee of Surveying & Mapping (ICSM) formed the Roads Working Group, Australia & New Zealand (RWG) October 2006.
10. Pegin P., Ilyin A., Semenova K. *Features transport planning the network of municipal roads in northern region. Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. Series: Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore, 2020, vol. 49, pp. 397–401.
11. *FHWA Urban Boundary and Federal Functional Classification Handbook*. Transportation Statistics Office Florida, Department of Transportation Tallahassee. Florida, 2003.
12. *Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures*, 2013, 70 p.
13. Bugromenko V. N. *Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya dorozhnoy seti na sebestoimost' produktsii i sotsial'nyye pokazateli regionov* [Mathematical modeling of the influence of the road network on the cost of production and social indicators of regions]. *Trudy Pervogo Vserossiyskogo Dorozhnogo Kongressa* [Proceedings of the first All-Russian Road Congress]. Moscow: MADI Publ., 2009, pp. 154–157. (In Russian)
14. Vasilevskiy L. I. *Transportnaya sistema SSHA: Sravnitel'nyy ekonomicheskyy analiz. Sorevnovaniye dvukh system* [Transport system of the USA: Comparative economic analysis. Competition of two systems]. Moscow: AN SSSR Publ., 1963, 67 p. (In Russian)
15. Geydt, A.A. *Strategicheskoye planirovaniye razvitiya dorozhnoy infrastruktury v transportnoy politike Rossii: avtoref. dis.... dokt. ekonom. nauk* [Strategic planning for the development of road infrastructure in the transport policy of Russia: author. dIss. ... Dr. Econ. Sciences]. St. Petersburg, 2005, 273 p. (In Russian)
16. Levitin I. *Transport kak usloviye ekonomicheskogo rosta* [Transport as a condition for economic growth]. *Rossiyskaya Federatsiya segodnya* [Russian Federation today]. 2008, Iss. 9, December, 13 p. (In Russian)

17. Moroz V. N., Nikolayev G. B. Razrabotka modeli otsenki effektivnosti funktsionirovaniya regional'noy transportnoy seti. MAT [Development of a model for assessing the effectiveness of the functioning of the regional transport network]. *Otchot o NIR* [Research report]. St. Petersburg: MAT Publ., 2002, 212 p. (In Russian)
18. Nemchinov D. M. *Printsipy i metody planirovaniya setey avtomobil'nykh dorog* [Principles and methods of planning road networks]. Moscow: TEKHPOLIGRAF-TSENTR Publ., 2014, 199 p. (In Russian)
19. Podoprigora N. V., Pegin P. A., Dotsenko S. N. *Informatsionnye aspekty sistemy "uchastnik dorozhnogo dvizheniya — transportnoe sredstvo — doroga — vneshnyaya sreda"*. *Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh: materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Information aspects of the system "road user — vehicle — road — external environment". Progressive technologies in transport systems: materials XVI International Scientific and Practical Conference]. Orenburg, 2021, pp. 395–402. (In Russian)
20. Pegin P. A. *Povyshenie effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii avtomobil'nogo transporta na osnove uvelicheniya propusknoy sposobnosti avtomagistralei: dlss. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving the efficiency and safety of road transport operation based on increasing the capacity of highways: dlss. ... Dr. tech. Sciences]. Orel: Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet Publ., 2011. (In Russian)
21. Pegin P. A., Tsutskarov V. K. *Analiz vneshnikh i vnutrennikh faktorov, vliyayushchikh na effektivnost' deyatel'nosti transportnogo predpriyatiya* [Analysis of external and internal factors affecting the efficiency of the transport enterprise]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2021, Iss. 1, pp. 22–32. (In Russian)

Received: February 05, 2023

Accepted: February 25, 2023

**Author's information:**

Pavel A. PEGIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor;  
ppavel.khv@gmail.com

Dmitriy M. NEMCHINOV — Applicant

Alexey A. ILYIN — Senior Lecturer; ilin@pgups.ru

УДК 629.433.2

## Перспективы применения автономного шинного трамвая Phileas с технологией магнито-электронного наведения

А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, И. К. Самаркина

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

**Для цитирования:** Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г., Самаркина И. К. Перспективы применения автономного шинного трамвая Phileas с технологией магнито-электронного наведения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 252–262. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-252-262

### Аннотация

**Цель:** Показать перспективность применения нового вида общественного городского транспорта автономного шинного трамвая системы Phileas без направляющего среднего рельса и контактной сети, с применением системы магнито-электронного наведения как более привлекательного для пассажиров, чем обычный трамвай, для городских перевозок, чтобы разгрузить улицы городов от автомобильных пробок. **Методы:** Проводились анализ и обобщение опыта работы ведущих предприятий, эксплуатирующих данный вид транспорта, таких стран как Нидерланды (Эйндховен, Амстердам), Франция (Дуэ), Германия (Кельн), Турция (Стамбул), а также Южная Корея и др. Выполнен анализ наиболее прогрессивных конструкций, примененных в данном транспортном средстве. **Результаты:** Опыт работы предприятий доказал целесообразность использования вагонов шинного трамвая без направляющего рельса для городов, но выявил целый ряд недостатков, связанных с несовершенством работы системы магнито-электронного наведения, имеющей целый ряд неустранимых недостатков. Подвижной состав Phileas показал себя недостаточно надежным в эксплуатации, что привело к его постепенному преждевременному изъятию и замене обычными сочлененными автобусами, т. е. превращению его из трамвая в обычную систему BRT. **Практическая значимость:** Применение автономной системы шинного трамвая без направляющего рельса и контактной сети имеет хорошие перспективы в городах, но необходимо применение более современной элементной базы для наведения с применением технологий искусственного интеллекта. Транспортная система Phileas просто несколько опередила свое время. В российских городах не стоит отказываться от развития существующих и строительства новых систем классического трамвая и легкорельсового транспорта.

**Ключевые слова:** Направляемый легкий транспорт, шинный трамвай, низкопольное многосекционное (сочлененное) транспортное средство, гибридный привод, система наведения.

В конце 90-х годов XX века в европейских городах в силу чрезмерного увлечения индивидуальными транспортными средствами возникли транспортные проблемы. Городским властям пришлось решать вопросы, связанные с высокой загруженностью городских улиц и резким ухудшением экологии, путем пересаживания жителей из автомобиля на общественный транспорт [1–4].

Во многих городах стали восстанавливать снятые трамвайные пути, усиливать автобусные маршруты. Для повышения комфорта пассажиров были разработаны и построены системы шинных трамваев с направляющим рельсом от компаний Bombardier и Translohr. Но эти системы не нашли широкого применения в городах в силу врожденного неустранимого конструктивного недо-



статка, связанного с применением специального среднего направляющего рельса [5]. Для повышения эксплуатационных свойств шинного трамвая было предложено создать транспортную систему без применения механической направляющей, заменив ее трассой с расположенными на ней магнитными датчиками.

В 2003 г. инженеринговая компания Advanced Public Transp Systems BV (APTS), входящая в автобусный холдинг VDL, при выполнении заказа городского совета города Эйндховена (Eindhoven), Нидерланды, выпустила первый образец уникального двухсекционного транспортного средства Phileas — городского трамвая на шинах (автобусного типа) без механической направляющей системы. Его можно назвать High-Quality Public Transport Concept (HQPT), т. е. высококачественной концепцией общественного транспорта, которая гармонично сочетает в себе множество оригинальных технических решений:

- современный необычный внешний вид;
- минимальное загрязнение окружающей среды;
- высокую пассажировместимость;
- высокую среднюю скорость движения;
- комфорт для пассажиров;
- наличие отличной информационной системы;
- высокую гибкость маршрута;
- прочность и долговечность конструкции.

Основная концепция — это шинный трамвай, который представляет собой высокопроизводительное и технически совершенное транспортное средство с характеристиками классического трамвая. Преимущество транспортного средства с магнито-электронным наведением по сравнению с традиционным трамваем или системой Translohr заключается в снижении затрат: инфраструктура намного дешевле в установке и обслуживании из-за отсутствия рельсов и контактной сети [6, 7].

Транспортные средства производились на заводе VDL Bus Heerenveen bv в Херенвене (Нидерланды). Компания построила для Эйндховена 12 единиц транспортных средств — «экспериментальных прототипов» с особым дизайном, для обслуживания зоны застройки Westcorridor. Большая часть подвижного состава имела длину 18 метров с одинарным сочленением (рис. 1), но были 24-метровые варианты с двойным сочленением (рис. 2). Концепция также допускала еще более длинные 26-метровые варианты с двойным сочленением — для использования там, где местные законы разрешают транспортные средства такой длины (рис. 3) [8].

Предполагалось их использовать на маршруте, начинающемся у северо-западной части городского центра, пролегающем по специальному коридору через район центрального вокзала, спортивный комплекс (Stadionkwartier), жилые районы и заканчивающемся у международного аэропорта Eindhoven.

Рекуперация в настоящее время применяется на рельсовом транспорте, практически мало используется на автобусах и автомобилях, но на Phileas ее удалось успешно применить.

Транспортные средства Phileas первого поколения оснащались гибридной системой LPG — электрическая передача (компания Alstom). Гибридный электропривод серийного типа включал в себя небольшой двигатель внутреннего сгорания (ДВС), работающий на сжиженном нефтяном газе. ДВС работал с постоянной частотой вращения в режиме максимальной эффективности, приводил в действие электрогенератор, от которого ток поступал к управляемым электромотор-колесам и в аккумуляторную систему из батарей NiMH (никель-металлгидридные аккумуляторы — АКБ). Такая система накапливала также энергию, полученную при торможении машины или ее движении на скоростных спусках. В случае, когда для движения машины использу-



Рис. 1. Двухзвенное транспортное средство Phileas длиной 18 метров, двери с одной стороны, на маршруте в Эйндховене (Нидерланды)



Рис. 2. Трехзвенный Phileas длиной 24 метра (двери с одной стороны) в Эйндховене (Нидерланды)



Рис. 3. Трехзвенный Phileas длиной 26 метров, двери с двух сторон, на маршруте ИЕТТ-Metrobus в Стамбуле (Турция)

ется часть мощности ДВС, другая часть подзаряжала АКБ.

Заряда АКБ хватало, чтобы транспортное средство могло проехать до 3 км по городу с выключенным ДВС. Было заявлено, что использование этого типа гибридного привода позволяло снизить расход топлива до 30 % по сравнению с автобусом, который работает на сжиженном газе, сопоставимого размера.

Все колеса, кроме передних, имели уникальный приводной механизм — рулевое управление на все колеса. Это позволяло транспортным средствам Phileas двигаться боком (по-крабьи) и на автобусных остановках обеспечивать очень точную стыковку с зазором между транспортным средством и платформой всего в 5 см. Посадочные платформы автобусных остановок имели ту же высоту, что и пол автобусов, что улучшало доступ людей с ограниченными возможностями и позволяло ускорить посадку (высадку) пассажиров, а также помогало сократить время ожидания при вызове на автобусных остановках.

По результатам эксплуатации была проведена доработка одного транспортного средства — оно было оснащено маховиком, который запасал энергию, необходимую для запуска с места, после чего включался ДВС на сжиженном газе. Для повышения топливной экономичности маховик подзаряжался во время рекуперативного торможения в процессе замедления.

Для снижения затрат и веса транспортных средств, а также для устранения проблем с перегревом двигателей, работающих на сжиженном газе, автобусы Phileas второго поколения изготавливались параллельными дизель-электрическими гибридами с использованием гибридно-электрической трансмиссии GM Allison. После опыта эксплуатации первоначальные транспортные средства были переведены на эту конфигурацию привода. Одним из следствий этого является то, что приводятся в движение только задние колеса.

Новый, более тихий двигатель позволил снизить расход топлива на 25 %. Замена двигателя привела к увеличению заднего свеса транспортного средства на 40 см. Система кондиционирования воздуха заменена на систему с лучшей охлаждающей способностью, чем предыдущая система.

Несколько машин по требованию заказчиков были произведены как электрические гибриды с водородными топливными элементами.

В ноябре 2005 г. было подписано соглашение о передаче лицензии и технологии между компанией-изготовителем APTS и Корейским научно-исследовательским институтом железных дорог (KRRRI). Корейская версия транспортного средства Phileas была изготовлена к маю 2011 года.

В Беларуси компания «Белкоммунмаш» (сейчас это ВКМ Holding) с 2008 года производит низкопольные троллейбусы и электробусы на базе Phileas, как однозвенные (АКСМ-420), так и двухзвенные (АКСМ-433). Эти машины работают во многих городах Беларуси (Минск, Витебск, Гомель и др.) и ряде городов России (Тула, Белгород).

В 2020 году компания ВКМ Holding поставила 20 сочлененных двухзвенных троллейбусов модели 433.030 Vitovt Max II в Санкт-Петербург, где эти машины и в настоящее время работают на маршрутах 1 и 6 троллейбусных парков города (рис. 4) [8–10].

Для повышения топливной экономичности в конструкции кузовов Phileas широко были использованы легкие материалы, такие как алюминий и пластик (плоский пол и потолок изготовлены из алюминиевых панелей). Были проведены краш-тесты, которые доказали высокую прочность кузова Phileas при опрокидывании. Так как транспортное средство создано из материалов, не подверженных коррозии, то изготовителем было заявлено, что долговечность конструкции должна была составлять не меньше 20 лет.

Транспортное средство имело модульную конструкцию, это позволило корректировать неко-





Рис. 4. Троллейбус модели 433.030 Vitovt Max II на базе Phileas в Санкт-Петербурге:  
длина (м) — 18,75; пассажировместимость (чел.) — 160; мест для сидения — 42;  
максимальная масса (кг) — 28 000; мощность электродвигателя (кВт) — 180

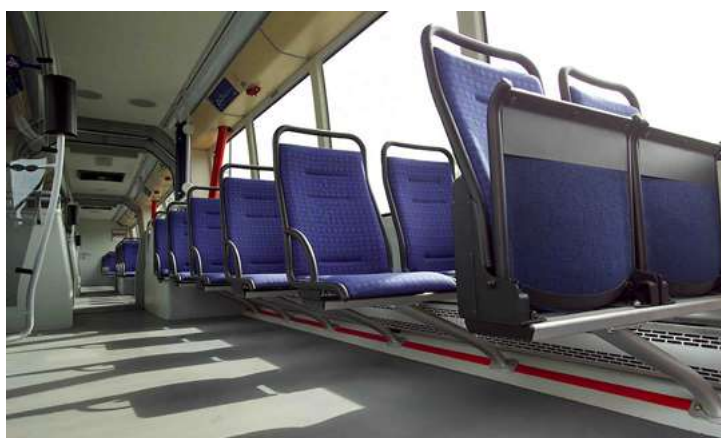


Рис. 5. Внутренний интерьер транспортного средства Phileas, имеется пространство для размещения багажа под сиденьями

торые конфигурации транспортного средства в соответствии с предполагаемыми требованиями заказчиков (расположение дверей и др.). Внутри все сиденья и стойки вмонтированы во внутренние стенки кузова — чтобы создать дополнительное пространство для размещения сумок (багажа) под сиденьями. Такое решение также упрощало внутреннюю уборку салона (рис. 5). Все транспортные средства Phileas были полностью оборудованы кондиционерами.

Phileas обеспечивал значительное изменение в улучшении условий для пассажиров. Дизельный двигатель работал очень тихо, ускорение происходило очень плавно. Благодаря хорошей подвеске транспортные средства плавно преодолевали любую неровность дорожного покрытия. Сеть остановок была продумана так, чтобы у людей имелись прекрасные возможности для пересадки на другие виды транспорта. Интервал между машинами на линии составлял не более 10 минут,



Рис. 6. Вид салона Phileas с узлом сочленения

а время всей поездки от «Центральной станции» до «Аэропорта Эйндховен» занимало менее 25 минут. По маршруту были оборудованы остановочные пункты с приподнятым основанием, которые позволяли пассажирам легко заходить в салон транспортного средства.

Остановки автобусов имели современный вид и были оборудованы информационными системами, которые сообщали, через какое время прибывает ближайшая машина. Множество автобусных остановок имели отдельные стоянки для автомобилей и велосипедов. Находящимся на борту Phileas пассажирам также была доступна информация относительно маршрута следования, очередности остановок и ожидаемого времени прибытия в конечную точку маршрута. Пол внутри салона был выполнен абсолютно плоский (рис. 6).

Отсутствовали даже какие-либо ступеньки и подиумы, обычные для низкопольных автобусов (трамваев), создающие неудобства для пассажиров. Широкие входные двери (1,2 метра) и минимальные перепады между уровнем остановки и полом автобуса позволяли пассажирам быстро

входить или покидать салон на остановках, а инвалидам на колясках заезжать в Phileas без посторонней помощи. Высокий комфорт в машинах Phileas обеспечивался и наличием в салоне обогревателя и кондиционера, а также пространства для багажа и держателей для инвалидных кресел. Для поддержания общей безопасности пассажиров транспорт был оснащен внутренними и наружными камерами видеонаблюдения.

Технические характеристики транспортных средств Phileas первого выпуска приведены в табл. 1.

Основой системы Phileas являлась новая для своего времени технология — магнито-электронного наведения, основанная на магнитных маяках FROG (Free Ranging в технологии Grid navigation). Транспортное средство, оснащенное FROG, было оборудовано бортовым компьютером, который содержал подробную карту схемы маршрута следования.

Данная технология хорошо подходила для транспортного средства, которое обычно следует одним и тем же заранее определенным марш-

ТАБЛИЦА 1. Техническая характеристика транспортного средства Phileas

| Наименование параметра                                                   | Phileas 18 м   | Phileas 24 м |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|
| Наименьший радиус поворота, м                                            | 11,8           | 11,2         |
| Максимальный преодолеваемый подъем на сухом твердом грунте, %            | до 13          |              |
| Количество управляемых колес                                             | 6              | 8            |
| Клиренс, мм                                                              | 180            |              |
| Длина, мм                                                                | 17 990         | 24 000       |
| Ширина, мм                                                               | 2540           |              |
| Высота, мм                                                               | 3120           |              |
| Колесная база передней секции, мм                                        | 7700           |              |
| Колесная база средней секции, мм                                         | —              | 6010         |
| Колесная база последней секции, м                                        | 7570           |              |
| Высота пола, мм                                                          | 340            |              |
| Высота ступени, мм                                                       | 320            | 320          |
| Снаряженная масса, т                                                     | 16,8           | 21,7         |
| Количество дверей                                                        | 3              | 4            |
| Ширина входной двери, мм                                                 | 1200           |              |
| Двигатель, модель, объем, л                                              | Ford V10 (6,8) |              |
| Мощность, л. с. при об/мин                                               | 219 при 3600   |              |
| Количество электромоторов                                                | 4              | 6            |
| Их суммарная мощность, кВт                                               | 242            | 295          |
| Максимальная скорость, км/ч                                              | 80             |              |
| Количество мест для сидения                                              | 30             | 38           |
| Максимальное количество пассажиров при плотности (4 чел/м <sup>2</sup> ) | 120            | 180          |

рутом и всегда может управляться вручную на других дорогах. Система FROG оснащена магнитами, которые встроены с интервалом 4 м в бетонное дорожное покрытие по всей трассе движения. Данные считываются бортовой компьютерной системой, которая также запрограммирована с указанием маршрута, по которому нужно следовать. Кроме того, компьютеры отслеживают обороты колес; это обеспечивает точную информацию о местоположении и помогает компьютеру направлять транспортное средство, как по правильному маршруту, так и к остановкам. Изготовители Phileas утверждали, что в неблагоприятных погодных условиях, таких как снег и лед, FROG обеспечивает более надежную систему, чем оптическая система наведения, которая использовалась французскими автобусами Cívís.

FROG также предоставляет данные о местоположении транспортного средства для электронных информационных систем «в режиме реального времени» — не только для пассажиров, ожидающих на автобусных остановках, но и для информационных объявлений и дисплеев для пассажиров в транспортном средстве, а также для «внесистемных» пользователей, таких как информационные службы на основе мобильных телефонов и Интернета.

Транспортное средство Phileas, оборудованное системой FROG, позволяло технически реализовать три варианта вождения:

— в автоматическом режиме компьютеры управляют ускорением, торможением и управлением/наведением. В нем автобус сам разгоняется до 70 км/час при любых погодных условиях, тормо-

зит, когда необходимо, и останавливается. Однако на автобусных остановках водитель-человек контролирует закрытие дверей;

- в полуавтоматическом режиме компьютеры управляют рулем, а водитель-человек управляет ускорением и торможением;

- в ручном режиме водитель-человек делает все, как обычный дорожный автобус.

С технической точки зрения эти транспортные средства могли управляться автономно, но из-за законодательства и отсутствия устройств обнаружения препятствий на транспортном средстве (и при движении по открытой дороге) на борту всегда необходим водитель.

Информационные технологии и система автоведения на Phileas соответствовали уровню безопасности SIL-4 (высший уровень надежности). Она контролирует скорость и направление движения транспортного средства и имеет отказоустойчивую архитектуру с тройным резервированием. Это означает, что система бортового компьютера состоит из трех одноплатных компьютеров в конфигурации «2 из 3». Каждый из них устанавливался в разных местах автобуса, чтобы избежать полного отказа системы в случае столкновения транспортного средства. Каждый компьютер получал данные от всех датчиков через два соединения компьютерной шины CAN и сравнивал их с результатами двух других компьютеров. В случае несоответствия данных неисправный компьютер выключался и вся система переходила в безопасное состояние, что означало остановку транспортного средства и открытие дверей.

Система также должна была всегда обеспечивать информацию о нахождении транспортного средства, поэтому при вызове на остановках она автоматически разблокировала пассажирские двери с нужной стороны (обочина или центральный остров) и вызывала торможение, а также если оно отклонялось более чем на 15 см от намеченного пути или если перед ним обнаружено препятствие.

Тестирование системы управления FROG на автобусах Phileas было сопряжено с трудностями — невозможностью настроить синхронизацию светофоров с движением Phileas, также автоматический режим управления так и не удалось согласовать с остановками на светофорах. Были проблемы с внимательностью водителя, особенно когда транспортное средство работало в автоматическом режиме.

Поскольку технические проблемы так и не удалось устранить, в сентябре 2008 года было официально принято окончательное решение отказаться от использования автоматической системы наведения FROG, за исключением стыковки на автобусных остановках. С этого момента транспортные средства Phileas стали использоваться просто как обычный автобус с водителем на линии BRT.

Транспортное средство в эксплуатации показало себя недостаточно надежным, что привело к его преждевременному изъятию из нескольких сетей, в которых оно работало. Наиболее частыми неисправностями являлись: проблемы с дифференциалом и рулевым управлением (иногда и поломка), чрезмерный износ шин, трещины на шасси, сбой системы кондиционирования, преждевременный износ тормозных накладок, утечки масла и воздуха и ряд других, неперечисленных проблем, которые затрудняли эксплуатацию транспортного средства.

Данные транспортные средства поставлялись и в ряд городов, и в другие страны (табл. 2).

К 2016 году все транспортные средства были изъятые из эксплуатации и заменены обычными многозвенными автобусами, за исключением транспортного предприятия в Стамбуле, где к концу 2022 года на ходу оставалось где-то 20 единиц Phileas.

Система Phileas, создание которой обошлось более чем в 80 миллионов евро, потерпела неудачу. В ноябре 2014 года VDL, материнская компания APTS, подала иск о банкротстве APTS. Это произошло из-за отсутствия новых заказов. Про-

ТАБЛИЦА 2. Эксплуатация транспортных средств Phileas в городах и странах

| Город (страна)         | Компания      | Количество, шт. | Длина, м | Технические особенности                           | Годы работы                  |
|------------------------|---------------|-----------------|----------|---------------------------------------------------|------------------------------|
| Эйндховен (Нидерланды) | SRE           | 11              | 18       | гибриды 1 поколения<br>переделаны в 2-е поколение | 09/2004 –<br>12/2016         |
|                        |               | 1               | 24       |                                                   |                              |
| Стамбул (Турция)       | IETT-Metrobus | 50              | 26       | гибрид дизель-электр.<br>двери с 2 сторон         | 2007 по н. в.                |
| Дуэ (Франция)          | SMTD Eveole   | 9               | 18       | гибрид дизель-электр.<br>двери с 2 сторон         | 2010–2014                    |
|                        |               | 2               | 24       |                                                   |                              |
| Кельн (Германия)       | PBK           | 2               | 18       | гибрид водород-электр.                            | 2011–2016                    |
| Амстердам (Нидерланды) | GVB           | 2               | 18       | гибрид водород-электр.                            | 2011–2014                    |
| Хайфа (Израиль)        | Метронит      | 6               | 18       | гибрид дизель-электр.                             | с 2013                       |
| Пескара (Италия)       | GMT           | 1               | 18       | гибрид дизель-электр.                             | не был введен в эксплуатацию |

ект Phileas закончился банкротством для компании, так как он несколько опередил свое время, но в перспективе самоуправляемые транспортные средства непременно станут реальностью, но уже с применением современных технологий искусственного интеллекта.

### Библиографический список

1. Киселев И. П. История скоростных сухопутных нетрадиционных видов пассажирского транспорта / И. П. Киселев // История науки и техники. — 2006. — № 8. — С. 2–12.
2. Киселев И. П. Развитие классификаций транспортных систем в СССР и России. Специфика колеечного (направляемого) транспорта / И. П. Киселев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2010. — Вып. 4 (25). — С. 168–178.
3. Фортунатов В. В. История мировых цивилизаций / В. В. Фортунатов. — СПб.: Питер, 2012. — 560 с.
4. Голубев А. А. История транспорта: учеб. пособие / А. А. Голубев, И. П. Киселев, В. И. Голубев и др.; под ред. В. В. Фортунатова. — СПб.: ПГУПС, 2013. — 134 с.
5. Воробьев А. А. Перспективы применения направляемого легкого транспорта в российских городах / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко // Транспорт Российской Федерации. — 2022. — № 3(100). — С. 40–43.
6. Современные трамваи: сочлененные, низкопольные, вместительные // Грузовик Пресс. — 2013. — № 9. — С. 64–66.
7. Воробьев А. А. Анализ современных технических решений, применяемых в конструкции низкопольных

трамвайных вагонов / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 1. — С. 1–15.

8. Городской транспорт. — URL: [trasnfoto.ru](http://trasnfoto.ru) (дата обращения: 04.02.2023).

9. Быльцева В. Д. Совершенствование конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге / В. Д. Быльцева, А. М. Будюкин, Е. В. Пакулина // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава: сб. трудов национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. — СПб.: ПГУПС, 2020. — С. 44–50.

10. Кондратенко В. Г. Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге / В. Г. Кондратенко, А. А. Воробьев, А. М. Будюкин и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС. — 2020. — Т. 17. — Вып. 1. — С. 62–67.

Дата поступления: 05.02.2023

Решение о публикации: 27.02.2023

### Контактная информация:

ВОРОБЬЁВ Александр Алфеевич —  
д-р техн. наук, проф.; 79219751198@yandex.ru  
БУДЮКИН Алексей Митрофанович —  
канд. техн. наук, доц.; ktexmet@yandex.ru  
КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич —  
канд. техн. наук, доц.; ktexmet@yandex.ru  
САМАРКИНА Ирина Константиновна —  
канд. техн. наук, доц.; irina\_samarkina@inbox.ru



## Horizon to Use Autonomous Tire Tram Phileas with Magnetic-Electronic Steering Technology

A. A. Vorobiev, A. M. Budyukin, V. G. Kondratenko, I. K. Samarkina

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

**For citation:** Vorobiev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G., Samarkina I. K. Horizon to Use Autonomous Tire Tram Phileas with Magnetic-Electronic Steering Technology // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 252–262. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-252-262

### Summary

**Purpose:** To show horizon to use new kind of public urban transport -autonomous tire tram of Phileas system without guide middle rail and catenarian, with magnetic-electronic steering system application – as more attractive for passengers than regular tram for urban transportations to free city lines from car jams. **Methods:** Analysis and generalization of work experience of leading enterprises, which exploit given kind of transport, of such countries as Netherlands (Eindhoven, Amsterdam), France (Due), Germany (Cologne), Turkey (Istanbul) as well as South Korea and so on, were held. The analysis of the most progressive constructions, applied in given vehicle, has been fulfilled. **Results:** Enterprise work experience has proved the feasibility to use tire tram wagons without guide rail for cities but revealed whole series of drawbacks, connected with the imperfections of the work of magnetic-electronic steering system that has whole row of irremovable flaws. Phileas rolling stock has demonstrated itself as insufficiently reliable in exploitation that has led to its gradual premature withdrawal and change with regular articulated buses, i.e. its conversion from a tram to usual BRT system. **Practical significance:** The use of tire tram autonomous system without guide rail and catenarian has good look-outs in cities but it's necessary to apply more up-to-date element base for steering with the use of artificial intelligence technology. Phileas transport system has simply got ahead of its time. It's worth not to refuse from the development of existing classical trams and light transport and the design of their new systems.

**Keywords:** Steered light transport, tire tram, low-floor instantaneous (articulated) vehicle, hybrid drive, steering system.

### References

1. Kiselev I. P. Istoriya skorostnykh sukhoputnykh netraditsionnykh vidov passazhirskogo transporta [History of high-speed land non-traditional types of passenger transport]. *Istoriya nauki i tekhniki* [History of science and technology]. 2006, Iss. 8, pp. 2–12. (In Russian)
2. Kiselev I. P. Razvitie klassifikatsiy transportnykh sistem v SSSR i Rossii. Spetsifika koleynogo (napravlyаемого) transporta [Development of classifications of transport systems in the USSR and Russia. Specifics of track (guided) transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2010, Iss. 4(25), pp. 168–178. (In Russian)
3. Fortunatov V. V. *Istoriya mirovykh tsivilizatsiy* [History of world civilizations]. St. Petersburg: Piter Publ., 2012, 560 p. (In Russian)
4. Golubev A. A., Kiselev I. P., Golubev V. I. et al. *Istoriya transporta: ucheb. posobie* [History of transport: textbook]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2013, 134 p. (In Russian)
5. Vorob'ev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Perspektivy primeneniya napravlyаемого legkogo transporta v rossiyskikh gorodakh [Prospects for the use of guided light transport in Russian cities]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2022, Iss. 3(100), pp. 40–43. (In Russian)
6. Sovremennye tramvai: sochlenennye, nizkopol'nye, vmestitel'nye [Modern trams: articulated, low-floor, roomy].

*Gruzovik Press* [Truck Press]. 2013, Iss. 9, pp. 64–66. (In Russian)

7. Vorob'ev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. Analiz sovremennykh tekhnicheskikh resheniy, primenyaemykh v konstruktsii nizkopol'nykh tramvaynykh vagonov [Analysis of modern technical solutions used in the design of low-floor tram cars]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 1, pp. 1–15. (In Russian)

8. *Gorodskoy transport* [City transport]. Available at: [rasnfoto.ru](http://rasnfoto.ru) (February 04, 2023). (In Russian)

9. Byl'tseva V. D., Budyukin A. M., Pakulina E. V. *Sovershenstvovanie konstruktsii podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: sb. trudov natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Improving the design of the rolling stock of light rail transport in St. Petersburg. Proceedings of the national scientific and technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2020, pp. 44–50. (In Russian)

10. Kondratenko V. G., Vorob'ev A. A., Budyukin A. M. et al. Evolyutsiya konstruktsii podvizhnogo sostava legkorel'sovogo transporta v Sankt-Peterburge [Evolution of the design of the rolling stock of light rail transport in St. Petersburg]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2020, vol. 17, Iss. 1, pp. 62–67. (In Russian)

Received: February 05, 2023

Accepted: February 27, 2023

#### Author's information:

Alexander A. VOROBIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; [79219751198@yandex.ru](mailto:79219751198@yandex.ru)

Alexey M. BUDYUKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; [ktexmet@yandex.ru](mailto:ktexmet@yandex.ru)

Vladimir G. KONDRATENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; [ktexmet@yandex.ru](mailto:ktexmet@yandex.ru)

Irina K. SAMARKINA — PhD in Engineering, Associate Professor; [irina\\_samarkina@inbox.ru](mailto:irina_samarkina@inbox.ru)