

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

Петербургского университета
путей сообщения

Издается с 1884 г.



Том 21
ВЫПУСК 4
2024

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 21, выпуск 4, 2024

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

Учредитель

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

Издатель

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

Адрес учредителя

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

Адрес издателя

111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ
Лефортово, ул. Авиамоторная, 50, стр. 2, помещ. 29/2

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис»: 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

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

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Фото на обложке предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС.

Подписано в печать с оригинал-макета 18.12.2024.

Формат 210 × 297. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,03.
Тираж 200 экз. Заказ 6005. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 21, issue 4, 2024

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

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University

Publisher

Media Service LLC under contract № ЭА00271, 19.12.2023

Founder's address

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

Publisher's address

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

Mass media registration certificate number

ПН N ФС2-7499 dd. 06.04.2005

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

The journal is registered

in the Russian Science Citation Index (RSCI)

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Kniga-Service": 33315

JOURNAL STAFF

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University, 2024.

СОДЕРЖАНИЕ



ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин**
Повышение энергоэффективности электрического торможения на скоростных линиях постоянного тока767
- С. В. Ключев, Н. А. Слободчикова, К. В. Плюта, А. В. Ключев**
Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог 775
- Л. В. Цыганская, А. Н. Смирнов, Д. Г. Бейн**
Выбор схем нагружения для оценки на сопротивление усталости элементов рам вагонов-платформ..... 787
- В. Н. Знаенок**
Разработка способа подвода тока к плечам выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов для электровозов серии «Ермак» 801
- М. Д. Д. Алсултан, М. В. Шевлюгин**
Обеспечение электроэнергетической доступности в районе Насирии и Басры (Южный Ирак) за счет системы нетягового электроснабжения скоростной железнодорожной магистрали.....814
- С. В. Трескин, Е. Ю. Дульский, В. А. Кручек, П. Ю. Иванов**
Обзор и классификация методов борьбы с подкожуховым льдообразованием в гидравлических гасителях колебаний подвижного состава 825
- Д. В. Осипов, А. П. Буйносов, И. А. Кудьяров**
Работа автотормозов грузового поезда при нарушении целостности тормозной магистрали..... 835
- Э. М. Каримов**
Прогнозирование влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог предгорной и горной местности на территории Юго-Западного Кыргызстана 846
- К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин**
Перераспределение транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий: постановка задачи и генетические алгоритмы 85
- Л. В. Мартыненко, Д. П. Кононов**
Совершенствование системы расследования аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте 866



ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

- А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков**
Физическое моделирование как инструмент верификации при решении задач геомеханики874
- О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская**
Критерии оценки эффективности технологий очистки городских сточных вод в соответствии с современным законодательством 891

Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси, И. А. Яицков Анализ предпосылок создания математической модели функционирования автосцепок груженых тяговых агрегатов.....	902
Д. А. Черепанова Учет влияния условий твердения бетона как фактор обеспечения требуемой надежности.....	909
Т. Л. Риполь-Сарагоси Исследование зависимости энергетической эффективности технологии адсорбционной осушки сжатого воздуха от модификации алюмогеля.....	922
Л. Ф. Казанская, В. А. Майер, Э. С. Сибгатуллин Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов	931
В. В. Веселов Инновационные способы усиления стен.....	944
А. Ю. Сулимин, С. М. Куценко, М. А. Иванов Использование геопозиционирования объекта для повышения точности работы защиты питающих линий системы тягового электроснабжения	954
Я. В. Мельник, А. Э. Федоров Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах	965



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

А. А. Привалов, Д. Д. Титов, А. И. Толстихин Программа визуализации результатов оценки и анализа качества функционирования IP-сети в условиях воздействия кибератак	973
Ф. А. Прошин Моделирование процесса привязки локальной шкалы времени через узлы оптической транспортной сети	981

CONTENTS



PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

- O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin**
Improving the energy efficiency of electric braking on high-speed DC lines767
- S. V. Klyuyev, N. A. Slobodchikova, K. V. Pluta, A. V. Klyuyev**
The use of man-made waste in strengthening the soils of highways..... 775
- L. V. Tsyganskaya, A. N. Smirnov, D. G. Bein**
Selection of loading schemes for assessing the fatigue resistance of frame elements
of flat cars 787
- V. N. Znaenok**
Development of a method for supplying current to the arms of a rectifier-inverter
converter based on IGBT for electric locomotives of the "Ermak" series..... 801
- M. J. J. Alsultan, M. V. Shevlyugin**
Provision of electric power accessibility in the Nasiriyah and Basra region (Southern Iraq)
due to the traction power supply system of the high-speed railway814
- S. V. Treskin, E. Yu. Dul'skij, V. A. Kruchek, P. Yu. Ivanov**
Review and classification of methods for combating internal ice formation in hydraulic
vibration dampers of rolling stock 825
- D. V. Osipov, A. P. Buinosov, I. A. Kudyarov**
Operation of auto brakes of a freight train in case of violation of the integrity of the
brake line 835
- E. M. Karimov**
Forecasting of soil moisture of the roadbed of automobile roads in foothill
and mountainous areas on the territory of Southwestern Kyrgyzstan..... 846
- K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin**
Redistribution of traffic flows between railway lines of different categories: problem
statement and genetic algorithms 856
- L. V. Martynenko, D. P. Kononov**
Improvement of the system of investigation of emergency situations in railway
transport..... 866



GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

- A. A. Sokornov, A. N. Kon'kov**
Physical modeling as a verification tool for geomechanical tasks solving874
- O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya**
Criteria for assessing the effectiveness of urban wastewater treatment technologies
in accordance with current legislation 891
- T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi, I. A. Yaitskov**
Analysis of the prerequisites for the creation of a mathematical model
of the functioning of automatic couplings of loaded traction units 902

D. A. Cherepanova	
Taking into account the influence of concrete hardening conditions as a factor in ensuring the required reliability.....	909
T. L. Ripol-Saragosi	
Dependence study energy efficiency of adsorption drying technology of compressed air air on modification of aluminogel	922
L. F. Kazanskaya, V. A. Mayer, E. S. Sibgatullin	
The relationship of factors determining the durability of concrete	931
V. V. Veselov	
Innovative ways to strengthen walls.....	944
A. Yu. Sulimin, S. M. Kutsenko, M. A. Ivanov	
The use of the object geopositioning for the increase of the accuracy of the protection operation of the supply lines of the traction power supply system.....	954
Ia. V. Melnik, A. E. Fiodorov	
Method of underwater urban tunnels construction in unrelated silty soils.....	965



HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. A. Privalov, D. D. Titov, A. I. Tolstikhin	
Program of visualisation of results of evaluation and analysis of IP-network functioning quality under the influence of cyber-attacks	973
F. A. Proshin	
Modeling of local time scale synchronization through optical transport network nodes	981



УДК 629.4-592

Повышение энергоэффективности электрического торможения на скоростных линиях постоянного тока

О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин

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

Для цитирования: Валинский О. С., Марикин А. Н., Калинин Н. П. Повышение энергоэффективности электрического торможения на скоростных линиях постоянного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 767–774. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-767-774

Аннотация

Цель: анализ энергоэффективности электрического торможения, рассмотрение режимов торможения, реализуемых высокоскоростным подвижным составом. **Методы:** применяется комплексный подход к проблеме энергетической эффективности режимов торможения высокоскоростного подвижного состава, ориентированный на практическую значимость и экономическую обоснованность результатов. **Результаты:** обоснована эффективность электрического торможения высокоскоростного подвижного состава, дана оценка использования электрического торможения при эксплуатации высокоскоростного подвижного состава, рассмотрены виды электрического торможения, произведен анализ энергоэффективности рекуперативного торможения при эксплуатации высокоскоростного поезда, рассмотрен коэффициент возврата электрической энергии. **Практическая значимость:** статья позволит совершенствовать существующую методику оценки энергопотребления высокоскоростных поездов, а также уточнить оценку эффективности использования рекуперативного торможения в единой системе движения высокоскоростных поездов.

Ключевые слова: расход энергии, энергоэффективность, оценка энергоэффективности, электрическое торможение, рекуперативное торможение, возврат энергии при рекуперации, скоростной поезд, высокоскоростной поезд

Введение

В соответствии с Энергетической стратегией холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года энергоэффективность и стремление к устойчивому развитию являются ключевыми задачами для отрасли железнодорожных перевозок [1, 2]. Одним из ключевых аспектов, необходимых для достижения этих амбициозных целей, является эффективное управление рекуперацией энергии. В железнодорожных системах торможение осуществляется двумя способами: механическим и электрическим. В то время как энергия, высвобождаемая в результате механического торможения, не может быть возвра-

щена в энергосистему, энергия, высвобождаемая в результате электрического торможения, может быть повторно использована в качестве рекуперативной энергии торможения. Этот вид энергии торможения изменяется в зависимости от динамики системы, ее можно вернуть в сеть, запасти в накопителях энергии [3] или преобразовать в тепловую энергию на реостатах на подвижном составе или на тяговой подстанции.

В этой статье рассматривается возможность повышения энергоэффективности рекуперативного торможения, а также расчет коэффициента возврата рекуперативной энергии торможения.

Оценка эффективности электрического торможения

Весь современный подвижной состав, находящийся в эксплуатации, начиная с электропоездов постоянного тока серии ЭТ2М и заканчивая высокоскоростными электропоездами «Сапсан», оснащается дополнительно к электропневматическому тормозу системами электрического торможения.

Система электрического торможения на высокоскоростном подвижном составе является приоритетной относительно пневматического тормоза. Управление торможением электропоезда с соответствующей скорости при ручном или автоматическом режиме производится от единого блока управления электрическим или пневматическим фрикционным тормозом.

Рекуперативный тормоз, не изнашиваемый по своей природе, обладает способностью возвращать в контактную сеть генерируемую в процессе торможения электрическую энергию. Он является дополнительным источником электрической энергии, которую можно использовать для собственных нужд или на тяговые нужды для другого подвижного состава. Эффективное использование рекуперативного торможения помогает сэкономить топливно-энергетические ресурсы и уменьшить объем условных потерь. Поэтому в иерархии систем электрическое торможение занимает приоритетное место. Однако рекуперация ограничивается тем, что в тяговой сети не всегда возможен прием электрической энергии.

Поэтому система электрического рекуперативного торможения дополняется реостатным торможением. Электрический тормоз за счет своего высокого быстродействия имеет хорошие регулировочные свойства относительно пневматического тормоза. Кроме того, при его использовании практически отсутствует возможность возникновения юза колесных пар.

Смешанное использование двух режимов электрического торможения — рекуперативного и реостатного — с технической точки зрения является возможным и считается обычным при нормальной эксплуатации. На рис. 1 представлена тормозная характеристика при рекуперативном и реостатном торможении высокоскоростного электропоезда. Характеристика рекуперативного торможения ограничена генерируемой мощностью тяговых электродвигателей, характеристика реостатного — интенсивностью теплоотвода, выделяемого тормозными реостатами [4, 5].

Тормозные характеристики в зоне высоких скоростей подчиняются закону поддержания постоянства мощности, а в зоне низких скоростей — постоянства тормозной силы [6].

Максимальная эффективность рекуперативного торможения достигается на участках с затяжными спусками или же на участках с тяговыми подстанциями, оборудованными инвертирующими агрегатами, которые могут возвращать электроэнергию в промышленную сеть [7].

Даже с учетом того, что высокоскоростные поезда преимущественно обращаются на участках с равнинным профилем пути, эффективность рекуперации является ключевым фактором в системе тягового электроснабжения и напрямую связана с уменьшением потребления топливно-энергетических ресурсов на сети железных дорог. Основные факторы, влияющие на рекуперацию электроэнергии, показаны в виде схемы на рис. 2.

Система торможения высокоскоростного электропоезда может применять электрический тормоз в широком диапазоне изменения скорости движения, что обусловлено системой управления асинхронными тяговыми электродвигателями. Автономный инвертор напряжения, входящий в состав системы управления

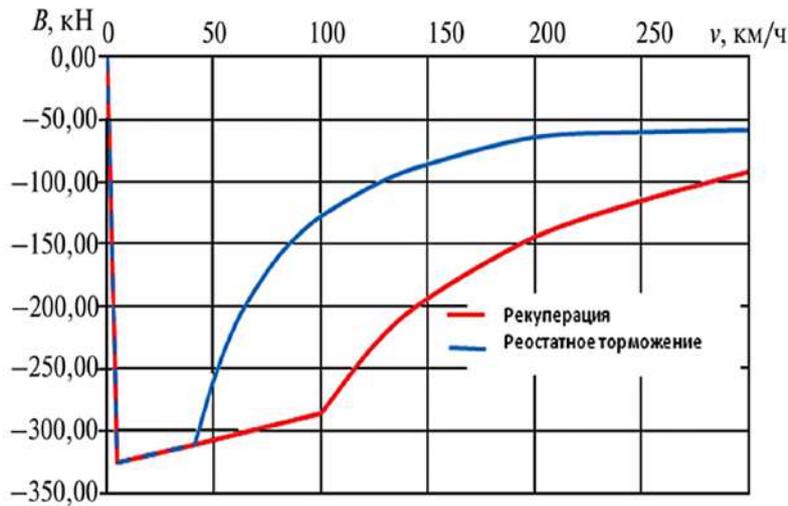


Рис. 1. Тормозные характеристики высокоскоростного поезда



Рис. 2. Основные факторы, влияющие на рекуперацию энергии торможения

асинхронными тяговыми электродвигателями, может обеспечивать реализацию электрического торможения до скорости 5 км/ч, ниже которой для поддержания тормозной силы поезд дотормаживается при помощи пневматического тормоза [6].

На применение рекуперативного торможения существует ограничение по сцеплению колес с рельсами, обусловленное максималь-

ной тормозной силой. Максимальное значение тормозной силы определяется по формуле:

$$B_{сц} = 0,8 \cdot P \cdot \psi_k, \tag{1}$$

где P — масса электропоезда;

ψ_k — расчетный коэффициент сцепления колес с рельсами.

Для поездов, эксплуатирующихся со скоростями движения выше 160 км/ч, применима формула для расчета коэффициента сцепления колес с рельсами:

$$\psi_k = 0,09 + \frac{95}{413 + 3 \cdot V_p} \quad (2)$$

Существенным недостатком электрического торможения является то, что при интенсивном торможении с использованием рекуперации в условиях ограниченного потребления рекуперированной энергии система управления переключает на режим реостатного торможения или частичного замещения электрического торможения пневматическим фрикционным.

В процессе движения высокоскоростного электропоезда реализуется режим интенсивного торможения до остановки, торможения с понижением скорости до существующих постоянных ограничений скорости движения и регулировочного торможения при прохождении входных стрелочных переводов раздельных пунктов [8].

Для анализа систем торможения с целью повышения энергоэффективности электрического торможения была создана математическая динамическая модель в программном комплексе MATLAB/Simulink [9, 10]. В результате расчетов математической модели установлено, что в режиме остановочного рекуперативного торможения при реально применяемой скорости начала торможения 200 км/ч и реализуемой максимальной тормозной силе возможный возврат электрической энергии составляет 237,3 кВт·ч, при этом длина пути торможения составляет 4712 м, время торможения — 177 с (3 мин). В этом режиме генерируемая мощность тяговых электродвигателей составляет 7100 кВт.

При этом потребителем рекуперированной энергии, находящимся в одной фидерной зоне со скоростным электропоездом, может быть 10-вагонный электропоезд пригородного движения, который при пуске и разгоне потребляет из тяговой сети 5000–5200 кВт. Другим потребителем рекуперированной энергии может

быть электровоз ЭП2к при работе на параллельной группировке тяговых электродвигателей 4300–4500 кВт.

Следовательно, рекуперированная энергия может потребляться только частично, в пределах 60–70 %. Реально система управления торможением переключает режим рекуперации на реостатное торможение. В этом случае длина тормозного пути возрастает до 8750 м, а время торможения — до 284 с (4 мин 44 с). Энергия торможения, выделяемая в тормозных резисторах в этом случае, составляет 214,2 кВт·ч. На рис. 3 представлен пример торможения, смоделированный в имитационной модели.

В результате замеров возвращаемой энергии электрического торможения электропоезда при аналогичных режимах торможения составляют 90–127 кВт·ч. Коэффициент возврата энергии (эффективности), который измеряет среднее использование регенерированной энергии, можно рассчитать как:

$$\eta_{rec\ eff} = \frac{\Delta E_{izm}}{\Delta E_{mod}}, \quad (3)$$

где $\eta_{rec\ eff}$ — коэффициент возврата энергии;

ΔE_{izm} — экономия энергии при реальной поездке, измеренная на счетчиках энергии подвижного состава;

ΔE_{mod} — экономия энергии при моделировании торможения, измеренная на счетчиках энергии подвижного состава.

Таким образом, коэффициент возврата будет варьироваться в пределах от 37 до 54 %.

В случае применения пониженной тормозной силы, например до 80 % от максимальной мощности, генерируемая тяговыми двигателями при торможении энергия составляет 5500–5700 кВт·ч, что соизмеримо с мощностью, потребляемой пригородным электропоездом в процессе пуска и разгона,

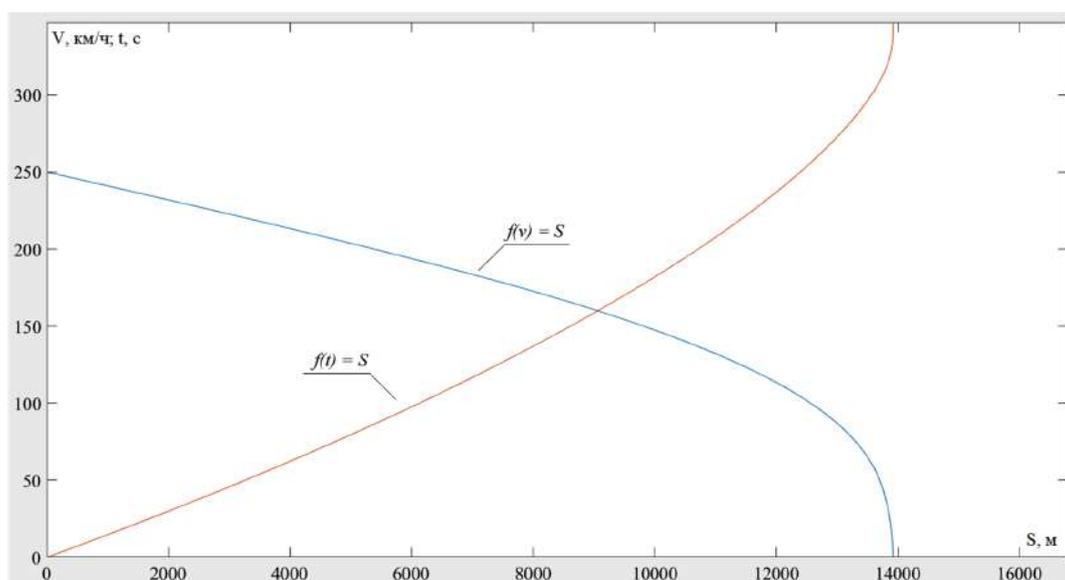


Рис. 3. Остановочное торможение в имитационной модели

и повышает эффективность энерговозврата энергии торможения.

Вместе с тем тормозной путь для режима рекуперативного торможения с заданной интенсивностью 80 % увеличивается до 5733 м, а время — до 217 с (3 мин 37 с).

При интенсивности рекуперативного торможения 70 % длина тормозного пути составляет 6430 м, время торможения — 245 с (4 мин 5 с), генерируемая мощность — 5000 кВт.

Таким образом, энергоэффективность рекуперативного остановочного торможения можно существенно повысить снижением интенсивности торможения до 70–80 % — в этом случае длина тормозного пути и время торможения составляют 55–70 % относительно аналогичных величин реостатного торможения.

В процессе наиболее часто употребляемого регулировочного торможения со скорости 220 км/ч до 200 км/ч в режиме рекуперативного торможения с максимальной интенсивностью длина тормозного пути составляет 1270 м, время торможения — 22 с, возможный возврат энергии рекуперации в этом случае составляет 41,6 кВт·ч. При невозможности полного

потребления возвращаемой энергии в тяговую сеть блок торможения электропоезда переключает управление на реостатное торможение. В этом случае длина тормозного пути возрастает до 2100 м, а время торможения — до 36 с, энергия торможения в реостатах составляет 32,6 кВт·ч.

При снижении интенсивности рекуперативного торможения до 80 % длина тормозного пути составляет 1490 м, а время торможения — 26 с. При этом возврат при наличии потребителя составит 39,2 кВт·ч. При интенсивности торможения 70 % длина тормозного пути составляет 1635 м, время торможения — 28 с, энергия рекуперации — 37,6 кВт·ч.

По сравнению с применяемым реостатным торможением длина тормозного пути и время тормозного замедления рекуперативного торможения с интенсивностью 70–80 % составляет 70–77 % от аналогичных величин реостатного тормоза.

Экспериментальные замеры возврата рекуперированной энергии при регулировочном торможении находятся в пределах 9–21 кВт·ч, при этом коэффициент возврата

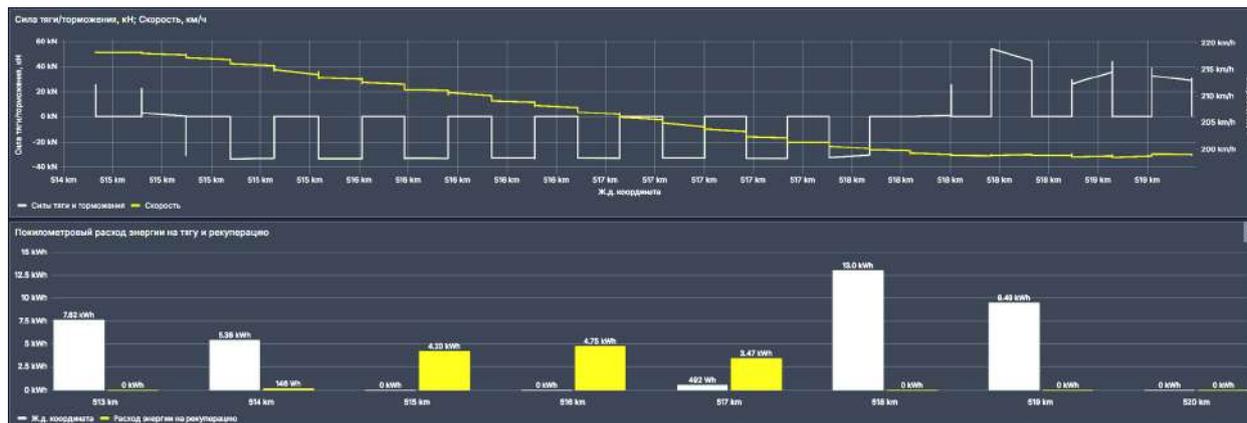


Рис. 4. Километровое возвращение электроэнергии высокоскоростным поездом «Сапсан»

находится в пределах от 21 до 50 %. На рис. 4 представлено километровое возвращение электроэнергии рекуперативным торможением высокоскоростного поезда «Сапсан» при регулировочном торможении с 220 км/ч до 200 км/ч на примере реального рейса.

Выводы

1. Энергоэффективность электрического торможения зависит от вероятности нахождения потребителя генерируемой энергии в одной фидерной зоне с высокоскоростным электропоездом.

2. При отсутствии или недостаточной мощности потребителя рекуперированной энергии система управления применяет реостатное торможение, при котором длина тормозного пути и время торможения возрастает в 1,6–1,7 раза.

3. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения, может быть достигнуто за счет снижения интенсивности рекуперации до 70–80 %. Таким образом, энергия, возвращенная в сеть, может быть использована смежным подвижным составом, а также длина и время торможения сокращаются на 60–70 % относительно затраченного времени и длины при использовании реостатного торможения.

Библиографический список

- Гапанович В.А. Энергоэффективность — путь к снижению затрат и к экологической безопасности // Железнодорожный транспорт. 2014. № 8. С. 22–25.
- Энергосбережение на железнодорожном транспорте: справ.-метод. изд. / В.А. Гапанович [и др.]; под ред. В.А. Гапановича. М.: Интехэнерго-Издательство, Теплоэнергетик, 2014. 304 с.
- Обухов М.Ю., Калинин Н.П. Повышение энергоэффективности электропоезда за счет установки накопителей электрической энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020. Т. 17. Вып. 4. С. 449–464.
- Тулупов В.Д. Улучшение энергетических показателей электропоездов // Железнодорожный транспорт. 1991. № 9. С. 38–41.
- Тулупов В.Д., Давыдкин А.В., Ворожцов А.В. Снижение потерь и увеличение возврата энергии при рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока // Пути экономичности и повышения эффективности использования электроэнергии в системах электроснабжения промышленности и транспорта: тезисы докладов 2-й Всесоюзной научной конференции (Смоленск, 1–2 декабря). М., 1987. С. 134–135.
- Ширяев А.В. Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2: учебное пособие. М., 2013. 594 с.

7. Инвентирование электроэнергии рекуперации / Е. И. Быков [и др.] // Улучшение энергетических показателей метрополитенов. М., 1987. С. 41–47.

8. Якушев А. Я. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 304 с.

9. Программа моделирования высокоскоростного поезда ЭВС1 в режиме торможения: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Свид. 2024661814 Российская Федерация. № 2024660851 / Валинский О. С., Евстафьев А. М., Калинин Н. П.; заявл. 14.05.2024; опубл. 21.05.2024; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU).

10. Программа моделирования высокоскоростного поезда ЭВС2 в режиме торможения: свиде-

тельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Свид. 2024662240 Российская Федерация. № 2024660850 / Валинский О. С., Евстафьев А. М., Калинин Н. П.; заявл. 15.05.2024; опубл. 24.05.2024; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU).

Дата поступления: 09.10.2024

Решение о публикации: 06.11.2024

Контактная информация:

Олег Сергеевич ВАЛИНСКИЙ — профессор, канд. техн. наук; rector@pgups.ru

Александр Николаевич МАРИКИН — профессор, докт. техн. наук; marikin_s@mail.ru

Николай Павлович КАЛИНИН — аспирант, инженер; nikolaykalinin1997@gmail.com

Improving the energy efficiency of electric braking on high-speed DC lines

O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin

Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering, 9, Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Valinsky O. S., Marikin A. N., Kalinin N. P. Improving the energy efficiency of electric braking on high-speed DC lines // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 767–774. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-767-774*

Abstract

Purpose: analysis of the energy efficiency of electric braking, consideration of braking modes implemented by high-speed rolling stock, analysis of electric braking. **Methods:** an integrated approach to the problem of energy efficiency of braking modes of high-speed rolling stock is used, focused on the practical significance and economic feasibility of the results. **Results:** the efficiency of electric braking of high-speed rolling stock is designated, the use of electric braking in the operation of high-speed rolling stock is assessed, types of electric braking are considered, the energy efficiency of regenerative braking in the operation of a high-speed train is analyzed, the coefficient of return of electrical energy is considered. **Practical significance:** this article will allow to revise the existing assessment of energy consumption of high-speed trains, will allow to assess the efficiency of using regenerative braking in a single system of high-speed train movement.

Keywords: energy consumption, energy efficiency, energy efficiency assessment, electric braking, regenerative braking, energy recovery during regeneration, high-speed train, high-speed train

References

1. Gapanovich V. A. Energoeffektivnost' — put' k snizheniyu zatrat i k ekologicheskoy bezopasnosti // *Zheleznodorozhnyj transport*. 2014. No. 8. S. 22–25. (In Russian)
2. Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: sprav.-metod. izd. / V. A. Gapanovich [i dr.]; pod red. V. A. Gapanovicha. M.: Intekhenergo-Izdat, Teploenergetik, 2014. 304 s. (In Russian)
3. Obuhov M. Yu., Kalinin N. P. Povyshenie energoeffektivnosti elektropoezda za schet ustanovki nakopitelej elektricheskoy energii // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. SPb.: PGUPS, 2020. T. 17. Vyp. 4. S. 449–464. (In Russian)
4. Tulupov V. D. Uluchshenie energeticheskikh pokazatelej elektropoezdov // *Zheleznodorozhnyj transport*. 1991. No. 9. S. 38–41. (In Russian)
5. Tulupov V. D., Davydkin A. V., Vorozhcov A. V. Snizhenie poter' i uvelichenie vozvrata energii pri rekuperacii na elektropodvizhnom sostave postoyannogo toka // *Puti ekonomichnosti i povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya promyshlennosti i transporta: tezisy dokladov 2-y Vsesoyuznoj nauchnoj konferencii (Smolensk, 1–2 dekabrya)*. M., 1987. S. 134–135. (In Russian)
6. Shiryaev A. V. *Vysokoskorostnye poezda "Sapsan" V1 i V2: uchebnoe posobie*. M., 2013. 594 s. (In Russian)
7. Inventirovanie elektroenergii rekuperacii / E. I. Bykov [i dr.] // *Uluchshenie energeticheskikh pokazatelej metropolitenov*. M., 1987. S. 41–47. (In Russian)
8. Yakushev A. Ya. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom*. M.: FGBOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2016. 304 s. (In Russian)
9. Programma modelirovaniya vysokoskorostnogo poezda EVS1 v rezhime tormozheniya: svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlya EVM. Svid. 2024661814 Rossijskaya Federaciya. № 2024660851 / Valinskij O. S., Evstaf'ev A. M., Kalinin N. P.; zayavl. 14.05.2024; opubl. 21.05.2024; zayavitel' i pravoobladatel' FGBOU VO PGUPS (RU). (In Russian)
10. Programma modelirovaniya vysokoskorostnogo poezda EVS2 v rezhime tormozheniya: svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlya EVM. Svid. 2024662240 Rossijskaya Federaciya. № 2024660850 / Valinskij O. S., Evstaf'ev A. M., Kalinin N. P.; zayavl. 15.05.2024; opubl. 24.05.2024; zayavitel' i pravoobladatel' FGBOU VO PGUPS (RU). (In Russian)

Received: 09.10.2024

Accepted: 06.11.2024

Author's information:

Oleg S. VALINSKY — professor, PhD in Engineering; rector@pgups.ru

Alexander N. MARIKIN — professor, Dr. Sci. in Engineering; marikin_s@mail.ru

Nikolay P. KALININ — postgraduate student, engineer; nikolaykalinin1997@gmail.com

УДК 625.7

Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог

С. В. Клюев^{1,2}, Н. А. Слободчикова³, К. В. Плюта³, А. В. Клюев¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46

² Российский университет дружбы народов, 117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Для цитирования: Клюев С. В., Слободчикова Н. А., Плюта К. В., Клюев А. В. Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 775–786. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786

Аннотация

Цель: анализ возможности использования техногенных отходов для укрепления и стабилизации грунтов дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог. **Результаты:** в статье отражены объемы накопления техногенных отходов и рассмотрены способы применения различных их видов для укрепления грунтов слоев автомобильных дорог. Наиболее исследованы золошлаковые отходы ТЭЦ. Также представляют интерес сельскохозяйственные отходы, такие как зола кофейной шелухи, зола багассы, целлюлоза. При этом имеющиеся исследования выполнены в достаточно узких областях. Недостаточно изучено влияние на долговечность укрепленных грунтов таких факторов, как увлажнение, высыхание, замерзание, оттаивание, динамическая нагрузка от транспортных средств, накопление пластических деформаций и т. д. Мало исследований в области оценки влияния материалов на окружающую среду. Во многих работах отмечается, что некоторые виды отходов, такие как зола рисовой шелухи, доменный шлак и зола-унос, нуждаются в дополнительных исследованиях с точки зрения повышения прочности. **Практическая значимость:** данный обзор может помочь в создании методов укрепления и стабилизации грунтов, которые были бы эффективными и долговечными при минимизации воздействия техногенных отходов на окружающую среду. Применение техногенных отходов в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, позволяет снизить стоимость строительства и утилизировать отходы. Необходимы дополнительные исследования, чтобы расширить область применения техногенных отходов в дорожном строительстве в зависимости от вида грунта, конструктивного слоя автомобильной дороги и климатических условий района строительства.

Ключевые слова: укрепление грунтов, стабилизация грунтов, техногенные отходы, составы укрепленных грунтов

Введение

В Российской Федерации финансирование сети автомобильных дорог регионального и местного значения ограничено. В этих условиях особенно важным является применение экономичных технологий строительства авто-

мобильных дорог. К таким технологиям относится укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами.

Укрепленные грунты применялись уже более 2000 лет назад при постройке пирамид

Шансы и для укрепления дорог в Древнем Риме. В Европе и России разработка способов и методов укрепления грунтов началась в конце XIX века, после изобретения цемента. В СССР было построено около 60 000 км автомобильных дорог с применением укрепленных грунтов, при этом научные основы были заложены М. М. Филатовым и В. М. Безруком. Ученые сформулировали положение, согласно которому при разработке любых методов укрепления грунтов необходимо всесторонне учитывать свойства тонкодисперсной части грунта, емкость обмена и состав поглощающего комплекса, а также генетические признаки грунта [1, 2].

В российской практике дорожного строительства, согласно ГОСТ Р 70452-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия», используются две технологии:

- укрепление грунтов — введение добавок неорганических вяжущих с целью повышения их прочности, морозостойкости, водостойкости;

- стабилизация грунтов — введение добавок неорганических вяжущих с целью улучшения их водно-физических свойств.

Методы укрепления грунтов неорганическими вяжущими материалами позволяют эффективно использовать техногенные отходы, что, в свою очередь, сокращает потребление природных ресурсов и позволяет улучшить экологическую ситуацию.

Ежегодно в мире образуется огромное количество техногенных отходов. Согласно официальному сайту Евростата [3], в результате всех видов экономической деятельности в странах Евросоюза в 2020 году образовалось 2135 млн т отходов. Наибольший объем приходится на строительство и добычу полезных ископаемых (рис. 1).



Рис. 1. Образование отходов в странах Евросоюза по видам экономической деятельности, по данным за 2020 год [3]

В Российской Федерации образование отходов значительно выше (рис. 2): 95% всех образующихся отходов приходится на добычу полезных ископаемых.

Всесторонний обзор опубликованной литературы показывает, что существует значительное количество исследований использования традиционных и нетрадиционных вяжущих для стабилизации и укрепления грунтов автомобильных дорог.

Обзор [4] обобщает существующие знания об укреплении грунта с помощью вяжущих, полученных из различных твердых отходов. Описывает технологию изготовления супергидрофобных вяжущих грунта и гипотезу изготовления новых супергидрофобных вяжущих грунта из твердых отходов. Дает оценку использованию этих видов супергидрофобных вяжущих грунта для дорожного строительства.

В [5] представлен обзор различных методов укрепления и стабилизации дисперсных грунтов. Авторы показывают, что добавление лигносульфоната, диоксида кремния и стальных шлаков значительно повышает прочность грунта и снижает его дисперсность. Также было установлено, что использование цемент-

ного клинкера, золы-уноса класса С, целиака и наноматериалов эффективно для укрепления и стабилизации дисперсных грунтов.

В [6] авторы указывают, что использование техногенных отходов при укреплении набухающих грунтов земляного полотна является устойчивым, безвредным для окружающей среды, менее дорогостоящим и эффективным при восстановлении инженерных свойств материалов земляного полотна. Этот обзор раскрывает возможность использования изученных отходов для укрепления и стабилизации набухающих грунтов.

В обзоре [7] рассматриваются исследования эффективности золы-уноса в качестве вяжущего для укрепления и стабилизации грунта и в улучшении механических характеристик набухающих грунтов.

В обзоре [8] предпринята попытка исследовать разнообразие твердых отходов, которые использовались для укрепления и стабилизации грунта в качестве вяжущего в сочетании с известью и цементом или без них, чтобы найти возможные способы использования твердых отходов на практике в геотехнических целях.

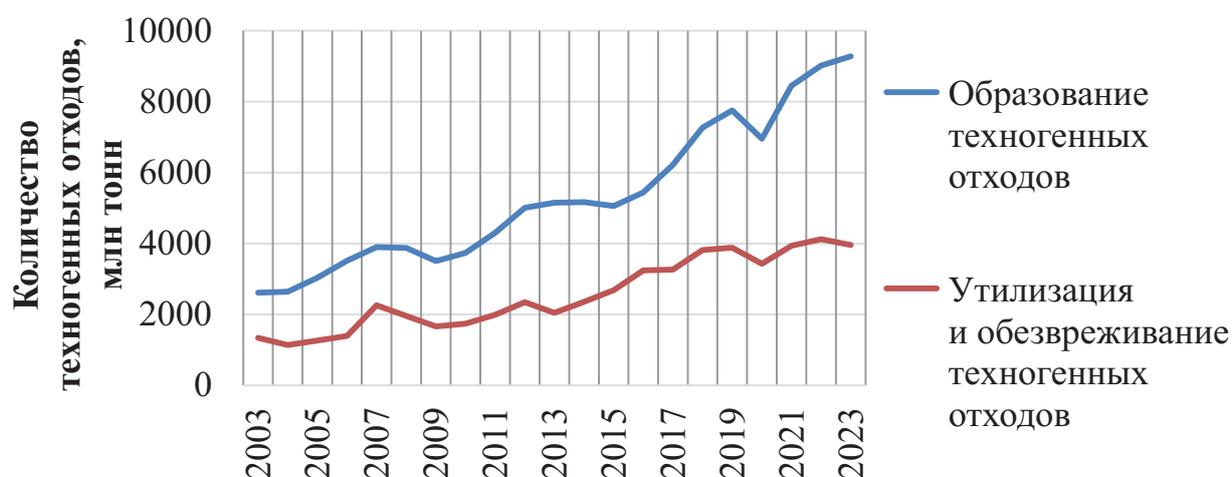


Рис. 2. Образование и утилизация техногенных отходов в РФ

Несмотря на растущий интерес к использованию техногенных отходов для укрепления и стабилизации грунтов, отсутствует систематический и всеобъемлющий обзор применения видов техногенных отходов в зависимости от вида грунта. Таким образом, существует необходимость в обзоре доступной литературы, чтобы обеспечить всестороннее понимание использования техногенных отходов для укрепления и стабилизации грунта. Такой обзор мог бы помочь в создании методов укрепления и стабилизации грунтов, которые были бы эффективными и долговечными при минимизации воздействия техногенных отходов на окружающую среду.

Обзор литературы

Качественные характеристики укрепленных грунтов

К основным качественным прочностным характеристикам укрепленных и стабилизированных грунтов относятся [9, 10]:

- *Прочность на сжатие.* Это одна из основных качественных характеристик, которая определяется путем нагружения стандартных образцов укрепленного грунта статической нагрузкой на прессе.

- *Морозостойкость.* Это отношение значения прочности на сжатие образцов, подверженных предварительному переменному замораживанию и оттаиванию, к значению прочности на сжатие. Данная характеристика особенно важна для оценки возможности применения материалов в условиях континентального и полярного климата.

- *Калифорнийское число CBR.* Показатель характеризует несущую способность грунта. Данная характеристика определяется на образцах, подвергнутых предварительному водонасыщению, с последующим вдавливанием штампа в образец укрепленного грунта.

Калифорнийское число CBR косвенно характеризует прочность материалов на сдвиг и их жесткость [11]. В исследованиях приведены эмпирические зависимости модуля упругости и CBR.

W. Heukelom и A. J. G. Klomp [12]

$$E = 10,342 \cdot CBR$$

Green and Hall [11]

$$E = 37,294 \cdot CBR^{0,71}$$

Witczak [12–13]

$$E = 20,684 \cdot CBR^{0,65}$$

Witczak [12–14]

$$E = 9,79 \cdot CBR$$

Виды и способы применения отходов

Исследованиям по применению этих материалов посвящены работы различных ученых. В частности, в конструкциях автомобильных дорог можно эффективно применять:

- *Переработанный бетонный порошок (RCP)* – побочный продукт переработки бетона. Введение порошка в глинистые грунты в количестве 1–5 % повышает прочность на сжатие и растяжение при увеличении содержания RCP в смеси и сроков твердения [3].

- *Измельченный стеклянный порошок и известь.* Стеклянный порошок получают путем измельчения стекловолокна или различных отходов стекла. Введение стеклянного порошка (10% и 30%) в сочетании с известью (5% и 12%) в глинистые грунты снижает их дисперсность [3].

- *Лигносульфонат* — продукт технологической переработки растительного древесного сырья при производстве бумаги. Введение в глинистые грунты лигносульфоната в количестве до 1,5% с добавкой полипропиленового волокна или без него снижает дисперсность грунтов [3].

- *Пары кремнезема* — побочный продукт при производстве ферросилиция и кремниевых сплавов. Введение в глинистые грунты паров кремнезема в количестве 5–15% позволяет снизить их набухание и усадку [3].

- *Порошок из яичной скорлупы* — отходы, получаемые из куриных инкубаториев, ресторанов быстрого питания и гостиниц. Данный вид отхода содержит большое количество карбоната кальция. Известь из яичной скорлупы обеспечивает более высокий уровень прочности и жесткости по сравнению с обычной известью при стабилизации грунтов, в том числе в сочетании с молотым стеклом [8, 15].

- *Золошлаковые отходы тепловых электростанций* — продукты сжигания углей. Эти отходы представляют наибольший интерес, так как они имеют наибольшие объемы накопления в Российской Федерации, составляющие, по разным оценкам, около 1,1–1,7 млрд т (примерно 50% от общей массы отходов на хранении).

В различных источниках приводятся разные классификации этого вида отходов [18–25]. Наиболее широкое применение получили золы-уносы в качестве вяжущего или компонента комплексного вяжущего [19, 21, 22, 25–29].

Золошлаковые смеси можно рассматривать как техногенный грунт либо применять в виде компонента комплексных вяжущих путем предварительного высушивания и измельчения [25].

Введение в набухающие глинистые грунты сланцевой золы совместно с портландцементом в количестве 30% и 4% соответственно позволяет снизить набухание и линейную усадку, число пластичности, а также повысить прочностные характеристики обработанного грунта [24].

Золы биомассы (BBA) и золы-уносы биомассы (BFA) — отходы от сжигания древесных опилок, щепы, коры и др. Комплексная добавка в глинистые грунты золы биомассы (5% от

массы сухого грунта), извести (0,5% от массы сухого грунта) и раствора на основе нанокремнезема снижает количество извести до 66% и повышает физико-механические характеристики известь-грунтов [30].

Геополимеры на основе зол-уносов [31]. Геополимер получают путем активации золы-уноса щелочью, в результате которой на поверхности частицы золы-уноса образуются отверстия, которые заполняются более мелкими частицами. В дальнейшем щелочной раствор вступает во взаимодействие с частицами, расположенными внутри крупных частиц. Растворенные частицы золы-уноса образуют алюмосиликатный гель, обволакивающий элементы глинистого грунта. В результате этого взаимодействия в грунте образуется жесткая структура. При этом добавка золы-уноса составляет 25%.

Золы рисовой шелухи, золы багассы и золы навоза. Зола рисовой шелухи — побочный продукт рисовой мельницы, который получается при сжигании рисовой шелухи RHA. Зола багассы сахарного тростника (SCBA) образуется от сжигания отходов производства сахарозы из сахарного тростника. Зола коровьего навоза (CDA) образуется от сжигания отходов сельхозпредприятий.

Комплексное введение в глинистый грунт добавок из зол рисовой шелухи, багассы и коровьего навоза (7,5% от массы сухого грунта) увеличивает прочностные характеристики, а также возможность контролировать изменение объема [32].

Золы бумажного шлама. В работе [33] исследовано влияние разрыхления на величину набухания стабилизированной сульфатсодержащей глины. В качестве вяжущих использовались известь и зола бумажного шлама.

Золы кофейной шелухи

Виды отходов производства кофе:

- кофейная шелуха является побочным продуктом кофейной промышленности, она относится к внешней оболочке плодов кофейной вишни;

- отработанный кофейный порошок (отрабатанная кофейная гуща) относится к осадку, оставшемуся после извлечения кофейных зерен из кофейного раствора;

- зола кофейной шелухи (СНА) — это тип твердых отходов, которые образуются в результате переработки кофейных зерен на ферме или заводе.

Введение в набухающий глинистый грунт золы кофейной шелухи совместно с известью позволяет снизить число пластичности и повысить несущую способность в большей степени, чем при укреплении и стабилизации только известью (добавление 15% СНА в грунт, стабилизированный 6%-ной известью, увеличило значение CBR на 19,5%). Кроме того, снижаются деформации набухания и усадки [34].

Введение в набухающий глинистый грунт 20% золы кофейной шелухи позволяет увеличить CBR в 3 раза, до 3,1%, при предварительном водонасыщении и с 8,3% до 10,67% в сухом состоянии. Кроме того, при концентрации СНА (20%) процент набухания уменьшается с 10% до 5,7%, что указывает на значительное снижение, примерно на 43% [35].

Биополимеры целлюлозы. В работе [36] показана эффективность биополимера целлюлозы (CL) в стабилизации латеритного грунта (грунты с высоким содержанием гидратов окиси железа и алюминия (65–80%) и низким содержанием кремнезема). С увеличением количества целлюлозы до 3% от массы сухого грунта значение CBR увеличивается на 110,4% во влажном состоянии и на 34,95% в сухом [36].

Золы багассы из сахарного тростника. Содержат большое количество клетчатки и крем-

незема. В работах [8, 37] исследованы образцы с использованием золы багассы с различным содержанием гашеной извести (0%, 6%, 10%, 18% и 25% от массы сухого грунта) в соотношении 3:1 соответственно. Результаты исследования показали улучшение характеристик набухания и усадки, прочности при сжатии и калифорнийского числа (CBR) в возрасте 3, 7 и 28 сут.

Золы из пальмового масла — отход сжигания пустых плодовых гроздей (EFB), волокон и скорлупы от производства пальмового масла (POS). Содержит большое количество кремнезема (61,98%) и глинозема (28,35%).

Результаты показывают, что использование только золы (10–40%) для стабилизации глинистого грунта приводит к небольшому увеличению прочностных характеристик образцов, в то время как сочетание золы с цементом приводит к резкому увеличению прочности образцов при одинаковых сроках твердения и снижению пластичности [8, 38].

Отходы пластика (ПЭТ)

В работе [39] исследовано применение ПЭТ в виде лент и крошки (около 5 мм), что позволяет повысить прочностные характеристики глинистого грунта. При этом использование большего количества пластиковых частиц (более 2%) в качестве армирующего материала значительно снижает прочность образца грунта. Добавление извести позволяет повысить прочностные характеристики. Использование ПЭТ в форме полос демонстрирует более высокую прочность и большую гибкость по отношению к приложенным нагрузкам по сравнению с ПЭТ в форме гранул.

Заключение

Влияние добавления различных видов техногенных отходов на свойства грунта являет-

ся сложной и многогранной темой, имеющей важное значение для дорожного строительства в различных климатических условиях. В обзоре рассмотрены различные аспекты применения техногенных отходов для укрепления грунтов и сформулированы выводы:

1. Применение техногенных отходов в дорожном строительстве позволяет экономить сырьевые ресурсы и утилизировать большое количество отходов.

2. Отходы сильно отличаются по химическому, минеральному и гранулометрическому составу. Имеющиеся исследования выполнены в достаточно узких областях.

3. Эффективность применения техногенных отходов для укрепления грунтов зависит от вида отхода, необходимости его дополнительной обработки (высушивания, измельчения), вида грунта, расстояния транспортировки.

4. Недостаточно изучено влияние таких факторов, как увлажнение, высыхание, замерзание, оттаивание, на долговечность укрепленных грунтов.

5. Недостаточно исследовано влияние укрепленных грунтов на основе применения техногенных отходов на окружающую среду.

Основываясь на приведенных выше выводах, авторы полагают, что необходимы дополнительные исследования, чтобы расширить область применения техногенных отходов в дорожном строительстве в зависимости от вида грунта, конструктивного слоя автомобильной дороги и климатических условий района строительства.

Библиографический список

1. Безрук В. М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1971. 247 с.

2. Филатов М. М. Основы дорожного грунтоведения. М.: Гострансиздат, 1936. 233 с.

3. Информация о количестве техногенных отходов. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation (дата обращения: 15.07.2024).

4. Fabrication of superhydrophobic soil stabilizers derived from solid wastes applied for road construction: A review / J. Lu [et al.] // *Transportation Geotechnics*. 2023. P. 40. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100974

5. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure / A. H. Vakili [et al.] // *Soil and Tillage Research*. 2024. 239 p. DOI: 10.1016/j.still.2024.106036

6. Tanyıldızı M., Uz V. E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // *Construction and Building Materials*. 2023. 398 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132435

7. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review / S. Ahmad [et al.] // *Results in Engineering*. 2024. 22 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102079

8. Vijayan D. S., Parthiban D. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil: A review // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. 20 p. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101108

9. Сокорнов А. А., Коньков А. Н., Лейкин А. П. Проведение стабилметрических испытаний дисперсных грунтов как строительных материалов // *Путевой навигатор*. 2021. № 46 (72). С. 28–36.

10. Оптимизация гранулометрического состава песчаного грунта при устройстве основания дорожных одежд из цементогрунта / С. А. Куюков [и др.] // *Путевой навигатор*. 2021. № 46 (72). С. 44–52.

11. Семенова Т. В., Долгих Г. В., Полугородник Б. Н. Применение калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетromетра для оценки качества уплотнения грунта // *Вестник СибАДИ*. 2014. № 1 (35). С. 59–66.

12. Heukelom, W., Klomp, A. J. G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After

Construction // Proc. of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. 1962.

13. Green J.L., Hall J.W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements. Vol. I: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure // Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1. 1975. 214 p.

14. Witzak M. W., Qi X., Mirza M. W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // Journal of Transportation Engineering. 1995. No. 3. P. 273–282.

15. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Resilient Modulus / B. Sukumaran [at al.] // Proceedings: Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference. 2002. 9 p.

16. Puppala A. J. Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design // NCHRP Synthesis 382, Transportation Research Board, National Research Council. Washington, 2008. 139 p.

17. Munirwan R. P., Jaya R. P., Munirwansyah R. Performance of eggshell powder addition to clay soil for stabilization // Int. J. Recent Technol. Eng. 2019. No. 8. P. 532–535. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123648

18. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / Renjith R. [at al.] // Journal of Cleaner Production. 2021. 294 p.

19. Лунев А.А. Обоснование расчетных значений механических характеристик золошлаковых смесей для проектирования земляного полотна: дисс. ... канд. техн. наук. Омск, 2019. 192 с.

20. Сиротюк В.В. Особенности свойств золоносных Экибастузских углей в связи с их применением в дорожном строительстве // Строительство и эксплуатация дорог: межвуз. сб. Новосибирск: НИСИ, 1977. С. 78–86.

21. Сиротюк В. В. Стандартизация и перспективы использования золошлаков энергетики для дорожного строительства в России // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование:

мат-лы III науч.-практ. семинара (22–23 апреля 2010 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 58–59.

22. Putilova I. V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. P. 31040–31048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.230

23. Effect of using Oil Shale Ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications / S.R. Rabab'ah [et al.] // Case Studies in Construction Materials. 2023. 19 p. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02508

24. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин [и др.] // Magazine of Civil Engineering. 2011. № 4. С. 16–21. DOI: 10.5862/MCE.22.2

25. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / R. Renjith [at al.] // Journal of Cleaner Production. 2021. 294 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126264.

26. Слободчикова Н.А., Лофлер М., Плюта К.В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость: научный журнал. 2017. Т. 7. № 2. С. 62–67.

27. Прогнозирование прочностных характеристик укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ неорганическими вяжущими материалами / Ю. Г. Лазарев [и др.] // Путевой навигатор. 2024. № 59 (85). С. 52–58.

28. Бирюков Ю.А., Бирюков А.Н., Титеев И.С. Вторичные строительные материалы в транспортном строительстве: анализ их применения и переработки при реконструкции объектов // Строительные и дорожные машины. 2023. № 10. С. 51–62.

29. Слободчикова Н.А., Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2. С. 141–147.

30. Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers / J. L. Díaz-López [at al.] // *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2023. 36 p. DOI: 10.1016/j.gete.2023.100496
31. Turkane S.D., Chouksey S.K. Design of low volume road pavement of stabilized low plastic soil using fly ash geopolymer // *Materials Today: Proceedings*. 2022. No. 65. Part 2. P. 1154–1160. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.167
32. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads / A. K. Yadav [at al.] // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. No. 10. P. 254–261. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.02.001
33. Rahmat M.N., Kinuthia J.M. Effects of mellowing sulfate-bearing clay soil stabilized with wastepaper sludge ash for road construction // *Engineering Geology*. 2011. No. 117. P. 170–179. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.10.015.
34. Utilization of coffee husk ash for soil stabilization: A systematic review / R. P. Munirwan [at al.] // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2022. 128 p. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103252.
35. Atahu M.K., Saathoff F., Gebissa A. Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. No. 11, iss. 2. P. 337–348. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.11.004.
36. Dhawale A.W., Banne S.P. Laterite soil stabilization using cellulose biopolymer // *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.062
37. Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash / H. Hasan [at al.] // *Procedia Eng*. 2016. P. 1368–1375. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.161
38. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement / S. Pourakbar [at al.] // *Transportation Geotechnics*. 2015. Vol. 3. P. 24–35. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.01.002
39. Koohmishi M., Palassi M. Mechanical Properties of Clayey Soil Reinforced with PET Considering the Influence of Lime-Stabilization // *Transportation Geotechnics*. 2022. 33 p. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100726

Дата поступления: 23.07.2024

Решение о публикации: 16.08.2024

Контактная информация:

СЛОБОДЧИКОВА Надежда Анатольевна — канд.

техн. наук, доцент; NSlobodchikova@rambler.ru

КЛЮЕВ Сергей Васильевич — докт. техн. наук,

профессор; klyuyev@yandex.ru

ПЛЮТА Ксения Викторовна — эксперт;

kv_plyuta@mail.ru

КЛЮЕВ Александр Васильевич — канд. техн.

наук, доцент; klyuyevav@yandex.ru

The use of man-made waste in strengthening the soils of highways

S. V. Klyuyev^{1,2}, N. A. Slobodchikova², K. V. Pluta², A. V. Klyuyev¹

¹ Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 46, Kostyukova st., Belgorod, Russia

² RUDN University, 6, Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov st., Irkutsk, Russia

For citation: Klyuyev S. V., Slobodchikova N. A., Pluta K. V., Klyuyev A. V. The use of man-made waste in strengthening the soils of highways // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 775–786. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786

Abstract

Purpose: analysis of the possibility of using man-made waste to strengthen and stabilize the soils of road surfaces and the roadbed. The use of man-made waste in soil compositions reinforced with inorganic binders makes it possible to reduce the cost of construction and dispose of man-made waste. **Objective:** to review the available literature for a comprehensive understanding of the possibility of using man-made waste to strengthen and stabilize the soil. **Results:** the article discusses the ways of using various types of man-made waste to strengthen soils. The ash and slag wastes of the CHP are the most studied. Agricultural wastes such as coffee husk ash, bagasse ash, and cellulose are also of interest. At the same time, the available research has been carried out in rather narrow areas, there is not enough research in the field of assessing the durability of materials under the influence of various factors (moisture-drying, freezing-thawing, dynamic load from vehicles, accumulation of plastic deformations, etc.), there is not enough research in the field of assessing the impact of materials on the environment. Many studies have noted that some types of waste, such as rice husk ash, blast furnace slag and fly ash, need additional research in terms of increasing strength. **Practical significance:** this review can help in the creation of methods for strengthening and stabilizing soils that would be effective and durable while minimizing the impact of man-made waste on the environment. Additional research is needed to expand the scope of man-made waste in road construction, depending on the type of soil, the structural layer of the highway and the climatic conditions of the construction area.

Keywords: soil strengthening, soil stabilization, man-made waste, reinforced soil compositions

References

1. Bezruk V. M. *Ukrepnenie gruntov v dorozhnom i aerodromnom stroitel'stve*. M.: Transport, 1971. 247 s. (In Russian)
2. Filatov M.M. *Osnovy dorozhnogo gruntovedeniya*. M.: Gostransizdat, 1936. 233 s. (In Russian)
3. Informaciya o kolichestve tekhnogennyh othodov. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation (data obrashcheniya: 15.07.2024). (In Russian)
4. Fabrication of superhydrophobic soil stabilizers derived from solid wastes applied for road construction: A review / J. Lu [et al.] // *Transportation Geotechnics*. 2023. P. 40. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100974.
5. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure / A.H. Vakili [et al.] // *Soil and Tillage Research*. 2024. P.239. DOI: 10.1016/j.still.2024.106036
6. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // *Construction and Building Materials*. 2023. 398 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132435
7. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review / S. Ahmad [et al.] // *Results in Engineering*. 2024. 22 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102079
8. Vijayan D.S., Parthiban D. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of

Expansive soil: A review // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. 20 p. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101108

9. Sokornov A.A., Kon'kov A.N., Lejkin A.P. Provedenie stabilometricheskikh ispytaniy dispersnyh gruntov kak stroitel'nyh materialov // *Putevoj navigator*. 2021. No. 46 (72). S. 28–36. (In Russian)

10. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava peschanogo grunta pri ustrojstve osnovaniya dorozhnyh odezhd iz cementogrunta / S. A. Kuyukov [i dr.] // *Putevoj navigator*. 2021. No. 46 (72). S. 44–52. (In Russian)

11. Semenova T.V., Dolgih G.V., Polugorodnik B.N. Primenenie kalifornijskogo chisla nesushchej sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya ocenki kachestva uplotneniya grunta // *Vestnik SibADI*. 2014. No. 1 (35). (In Russian)

12. Heukelom, W., Klomp, A. J. G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction // *Proc. of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*. 1962.

13. Green J.L., Hall J.W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements. Vol. I: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure // *Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1*. 1975. 214 p.

14. Witczak M.W., Qi X., Mirza M.W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // *Journal of Transportation Engineering*. 1995. No. 3. P. 273–282.

15. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Resilient Modulus / B. Sukumaran [at al.] // *Proceedings: Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*. 2002. 9 p.

16. Puppala A. J. Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design // *NCHRP Synthesis 382, Transportation Research Board, National Research Council*. Washington, 2008. 139 p.

17. Munirwan R.P., Jaya R.P., Munirwansyah R. Performance of eggshell powder addition to clay soil for stabilization // *Int. J. Recent Technol. Eng*. 2019. No. 8. P. 532–535. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123648

18. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / Renjith R. [at al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021. 294 p.

19. Lunev A. A. Obosnovanie raschetnyh znachenij mekhanicheskikh harakteristik zoloshlakovyh smesey dlya proektirovaniya zemlyanogo polotna: diss. ... kand. tekhn. nauk. Omsk, 2019. 192 s. (In Russian)

20. Sirotiyuk V.V. Osobennosti svoystv zolunosy Ekibastuzskikh uglej v svyazi s ih primeneniem v dorozhnom stroitel'stve // *Stroitel'stvo i ekspluatatsiya dorog: mezhvuz. sb. Novosibirsk: NISI*, 1977. S. 78–86 (In Russian)

21. Sirotiyuk V.V. Standartizatsiya i perspektivy ispol'zovaniya zoloshlakov energetiki dlya dorozhnogo stroitel'stva v Rossii // *Zoloshlaki TES: udalenie, transport, pererabotka, skladirovanie: mat-ly III nauch.-prakt. seminar (22–23 aprelya 2010 g.)*. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2010. S. 58–59. (In Russian)

22. Putilova I. V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. P. 31040–31048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.230

23. Effect of using Oil Shale Ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications / S.R. Rabab'ah [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. 2023 19 p. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02508

24. Primenenie zol i zoloshlakovyh othodov v stroitel'stve / N.I. Vatin [i dr.] // *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 4. S. 16–21. DOI: 10.5862/MCE.22.2 (In Russian)

25. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / R. Renjith [at al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021. 294 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126264.

26. Slobodchikova N.A., Lofler M., Plyuta K.V. Poluchenie neorganicheskogo vyazhushchego na osnove othodov promyshlennogo proizvodstva // *Izvestiya*

vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost': nauchnyj zhurnal. 2017. T. 7. No. 2. S. 62–67. (In Russian)

27. Prognozirovanie prochnostnyh karakteristik ukreplennyh zoloshlakovyh smesey TEC neorganichesкими vyazhushchimi materialami / Yu.G. Lazarev [i dr.] // Putevoj navigator. 2024. No. 59 (85). S. 52–58. (In Russian)

28. Biryukov Yu. A., Biryukov A.N., Titeev I.S. Vtorichnye stroitel'nye materialy v transportnom stroitel'stve: analiz ih primeneniya i pererabotki pri rekonstrukcii ob'ektov // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2023. No. 10. S. 51–62. (In Russian)

29. Slobodchikova N.A., Lofler M. Metodiki podbora sostavov gruntov, ukreplennyh izvest'yu, dlya dorozhnogo stroitel'stva // Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2018. T. 8. No. 2. S. 141–147. (In Russian)

30. Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers / J.L. Díaz-López [at al.] // Geomechanics for Energy and the Environment. 2023. 36 p. DOI: 10.1016/j.gete.2023.100496

31. Turkane S.D., Chouksey S.K. Design of low volume road pavement of stabilized low plastic soil using fly ash geopolimer // Materials Today: Proceedings. 2022. No. 65. Part 2. P. 1154–1160. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.167

32. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads / A.K. Yadav [at al.] // International Journal of Pavement Research and Technology. 2017. No. 10. P. 254–261. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.02.001

33. Rahmat M.N., Kinuthia J.M. Effects of mellowing sulfate-bearing clay soil stabilized with wastepaper sludge ash for road construction // Engineering Geology. 2011. No. 117. P. 170–179. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.10.015.

34. Utilization of coffee husk ash for soil stabilization: A systematic review / R.P. Munirwan [at al.] // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2022. 128 p. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103252.

35. Atahu M.K., Saathoff F., Gebissa A. Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. No. 11, iss. 2. P. 337–348. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.11.004.

36. Dhawale A.W., Banne S.P. Laterite soil stabilization using cellulose biopolymer // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.062

37. Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash / H. Hasan [at al.] // Procedia Eng. 2016. P. 1368–1375. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.161

38. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement / S. Pourakbar [at al.] // Transportation Geotechnics. 2015. Vol. 3. P. 24–35. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.01.002

39. Koohmishi M., Palassi M. Mechanical Properties of Clayey Soil Reinforced with PET Considering the Influence of Lime-Stabilization // Transportation Geotechnics. 2022. 33 p. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100726

Received: 23.07.2024

Accepted: 16.08.2024

Author's information:

Nadezhda A. SLOBODCHIKOVA — PhD in Engineering, Associate Professor;
NSlobodchikova@rambler.ru

Sergey V. KLYUEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; klyuyev@yandex.ru

Ksenia V. PLUTA — expert; kv_plyuta@mail.ru

Alexander V. KLYUYEV — PhD in Engineering, Associate Professor; klyuyevav@yandex.ru

УДК 629.463.62:620.169.1

Выбор схем нагружения для оценки на сопротивление усталости элементов рам вагонов-платформ

Л. В. Цыганская¹, А. Н. Смирнов¹, Д. Г. Бейн²

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

² АО «НВЦ «Вагоны», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 22, литера М, 1-й этаж, помещ. 5н

Для цитирования: Цыганская Л. В., Смирнов А. Н., Бейн Д. Г. Выбор схем нагружения для оценки на сопротивление усталости элементов рам вагонов-платформ // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 787–800. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-787-800

Аннотация

Цель: обеспечение безопасности движения в железнодорожной отрасли. Проблема трещин, периодически выявляемых при эксплуатации вагонов-платформ, требует новых подходов к теоретической и практической оценке показателей сопротивления усталости и трещиностойкости их конструкции. Особо актуально возникновение трещин в условиях низких температур. **Метод:** разработан экспериментальный метод определения спектра вертикального нагружения вагонов-платформ для перевозки контейнеров, обоснован спектр продольных нагрузок для вагонов, эксплуатирующихся в районах с низкими температурами. Предложен метод оценки трещиностойкости по экстремумам напряжений, определенных экспериментально. В основе метода — положения механики разрушения, позволяющие учесть влияние отрицательных температур. **Результаты:** по экстремумам напряжений в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины, определенным на основании предложенного метода, установлено, что в качестве схемы испытаний для экспериментальной оценки показателей сопротивления усталости при вертикальных и продольных нагрузках возможно использовать одну обоснованную схему, которая максимально нагружает все зоны вагона. По предложенной методике возможно установить размер допустимого трещиноподобного дефекта исходя из условий начального роста трещины. Коэффициенты интенсивности напряжений, полученные на основании экспериментально определенных экстремумов напряжений, показали, что в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров возможен рост трещин при отрицательных температурах, что не согласуется с методикой оценки усталостной прочности стандарта ГОСТ 33211-2014. **Практическая значимость:** предложенный метод оценки спектра вертикального нагружения вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров позволяет из множества разнообразных схем загрузки вагона выбрать одну для проведения испытаний, которая максимально нагружает все его потенциально опасные зоны. Отдельные результаты исследований использованы для разработки типовой методики испытаний на сопротивление усталости вагонов-платформ увеличенной длины.

Ключевые слова: вагоны-платформы, коэффициент запаса сопротивления усталости, трещиностойкость, спектр нагружения

Введение

С проблемой возникновения трещин на протяжении всей истории его существования в реальных конструкциях подвижного состава железных дорог приходится сталкиваться. При этом, несмотря на большой накопленный опыт теоретических и экспериментальных

исследований, появляются новые факторы, влияющие на показатели усталостной прочности и трещиностойкости подвижного состава. Такие факторы, как правило, связаны с изменением условий эксплуатации или внедрением принципиально новых конструктивных решений, и их зачастую очень сложно учесть при проектировании новых изделий.

Последний случай массовых отказов подвижного состава на колее 1520 по причине образования трещин в элементах рам вагонов-платформ произошел в 2005–2006 годах и был связан с введением в эксплуатацию четырехосных вагонов-платформ увеличенной длины (с длиной по осям сцепления автосцепок более 21 м). Основное назначение таких вагонов — перевозка крупнотоннажных контейнеров. Увеличенная длина позволила на один вагон установить четыре контейнера типоразмера 1CCC, 1CC, 1C или два контейнера 1AAA, 1AA, 1A стандарта ISO 668:1995 «Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и номинальные характеристики».

Трещины в конструкции рам вагонов-платформ увеличенной длины появлялись в течение первого года эксплуатации при назначенном сроке службы вагона 32 года. Развитие трещин происходило стремительно, не позволяя своевременно выявить их в эксплуатации, что ставило под угрозу безопасность движения. Очевидное отсутствие у рам вагонов должного запаса по усталостной прочности и низкая трещиностойкость потребовали оперативной разработки в 2006 году методики экспериментальных исследований, которая базировалась на отраслевом руководящем документе РД 24.050.37-95 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества».

В основу этой методики была положена широко известная гипотеза линейного суммиро-

вания повреждений (гипотеза Майнера), которая выражается равенством [1]:

$$\sum n_i / N_i = 1,$$

где n_i — число циклов приложенной нагрузки; N_i — число циклов до разрушения, определенное по кривой усталости при постоянной амплитуде) [1].

Возможность применения гипотезы линейного суммирования повреждений для оценки усталостной прочности рам вагонов-платформ, несмотря на то что на показатель $\sum n_i / N_i$ влияет множество факторов, обосновано большим количеством экспериментально определенных данных для типовых конструкций и сварных соединений, применяемых в вагоностроении.

Так, стандартом ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», а ранее отраслевыми документами, действующими на железнодорожном транспорте Российской Федерации, введен коэффициент запаса сопротивления усталости, который определяется отношением:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}},$$

где $\sigma_{a,N}$ — предел выносливости по амплитуде (Па) составной части вагона на базовом числе циклов $N_0 = 10^7$;

$\sigma_{a,\varepsilon}$ — приведенная амплитуда динамического напряжения (Па), эквивалентная по повреждающему действию распределению амплитуд напряжений за расчетный ресурс составной части, приведенная к базовому числу циклов $N_0 = 10^7$.

При этом предел выносливости $\sigma_{a,N}$ должен определяться с учетом среднего значения предела выносливости базового материала и коэффициента снижения предела выносливости K_σ , который учитывает тип сварного соединения, влияние механической обработки сварного соединения, дробеструйной обработки или

оплавления и величины дефектов, определяемых методами неразрушающего контроля.

Методика экспериментальных исследований 2006 года помогла справиться с поставленной задачей оперативного одновременного тестирования продукции непосредственно на заводах-производителях с использованием их оборудования и мощностей.

Дальнейший опыт эксплуатации и испытаний в период с 2006 по 2022 год различных конструкций вагонов-платформ увеличенной длины показал, что задача обеспечения запаса сопротивления усталости решена не полностью. Вопросы оценки усталостной прочности грузовых вагонов с использованием основных положений действующих российских стандартов исследованы в работе [2].

Основным недостатком методики 2006 года, по мнению авторов настоящей статьи, является неполный спектр нагружения, не учитывающий продольные нагрузки, а только спектр вертикального нагружения, который определен для одной схемы загрузки вагона, максимально нагружающей центральное сечение рамы. Выбор спектра нагружения при экспериментальной оценке сопротивления усталости вагонных конструкций представляет собой отдельную сложность, так как условия нагру-

жения конструкций вагона существенно отличаются в зависимости от схемы нагружения и характера перевозимого груза. Кроме этого, методика не предусматривала учет отрицательных температур, которые могут стать дополнительным фактором, приводящим к трещинообразованию.

Влияние частоты и спектра нагружения на усталость конструкции показана в работах [3, 4].

Спектры распределения сил в эксплуатации в соответствии со стандартом ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», действующим в Российской Федерации, для грузового подвижного состава, оборудованного поглощающими аппаратами различной энергоемкости (не менее 70 кДж для аппарата класса Т1 и не менее 100 кДж для аппарата класса Т2), приведены в табл. 1. Исследования в части определения параметров поглощающих аппаратов приведены в [5].

Определенную сложность представляет учет отрицательных температур. Экспериментальное определение характеристик статической прочности с учетом отрицательных температур не позволяет соотнести их с характеристиками усталостной прочности, поскольку нет достоверно установленных

ТАБЛИЦА 1. Спектр распределения продольных сил

Среднее значение силы в интервале, МН, для поглощающих аппаратов энергоемкостью не менее 70 кДж (не менее 100 кДж)	Число приложений силы за 1 год	
	растягивающей	сжимающей
0,3 (0,2)	2432 (2650)	800 (800)
0,6 (0,4)	5700	2000
1 (0,7)	5120	2230
1,4 (1)	3050	1410
1,8 (1,3)	800	800
2,2 (1,6)	180	200
2,6 (1,9)	0	50
3 (2,1)	0	9
3,35 (2,4)	0	1

зависимостей, связывающих данные характеристики. Определение необходимых параметров усталостной прочности на реальных вагонных конструкциях в условиях отрицательных температур является процессом экономически не оправданным.

Статические показатели прочности сталей имеют экспериментально подтвержденные зависимости от температуры. Например, в работе [15] предложена формула определения предела текучести материала в зависимости от температуры испытаний:

$$\sigma_{\tau T} = \sigma_{\tau} \exp \left\{ 340 \left[\exp \left(-\frac{\sigma_{\tau}}{220} \right) + 0,1 \right] \cdot \left(\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_0} \right) \right\}, \quad (1)$$

где σ_{τ} — предел текучести стали при температуре $T_0 = 20$ °С;

T — температура испытания, °С.

При этом известны работы в области механики разрушения, которые позволяют прогнозировать развитие трещиноподобных дефектов в зависимости от напряжений и показателей ударной вязкости. Например, путем оценки по диаграмме трещиностойкости коэффициент интенсивности напряжений K_I связывается с вязкостью разрушения и напряжением с помощью уравнения [7, 8]:

$$K_I \leq \frac{K_{mat}}{m_{FAD}} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_0} \right)^2}, \quad (2)$$

где K_{mat} — вязкость разрушения;

m_{FAD} — коэффициент запаса по трещиностойкости (коэффициент безопасности [7]);

σ_p — расчетное напряжение в конструкции.

В выражении (1) согласно [3] локальная прочность у вершины трещины определяется в зависимости от предела текучести материала уравнением вида:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_T} = -\frac{\beta}{2n_T} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\beta}{n_T} \right)^2 - \frac{(1+\nu^2-\nu)(\beta/n_T)^2 - 1}{(1-2\nu)^2}}, \quad (3)$$

где ν — коэффициент Пуассона, функция относительной длины трещины, геометрии и условий нагружения;

n_T — коэффициент запаса по пределу текучести.

Коэффициент безопасности определяется по формуле, приведенной в [3]:

$$m_{FAD} = n_T \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_T / n_T}{\sigma_0} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_0} \right)^2}}. \quad (4)$$

Упрощенный метод определения коэффициента безопасности, предложенный в работе [7], возможно применить на практике, однако отсутствуют сведения об экспериментальном подтверждении этого метода для реальных конструкций.

Вопросам разработки силовых критериев прочности, устанавливающих влияние отрицательных температур на трещинообразование, посвящены также работы [9, 10]. Однако использование метода конечных элементов для оценки коэффициентов интенсивности напряжений в зонах локальных концентраторов [9] в вагонных конструкциях требует дополнительного изучения в связи с необходимостью правильно подобрать размер и функцию формы конечного элемента в каждой конкретной практической задаче. Наиболее простым с точки зрения практического применения выглядит вычисление методом J-интеграла с использованием ANSYS, который хорошо согласуется со многими экспериментальными методами [11].

Значительный практический интерес для оценки процесса трещинообразования в вагонных конструкциях при отрицательных температурах представляют экспериментально подтвержденные зависимости коэффициентов интенсивности напряжений K_{c^*} и K_{1c} , определенных при температуре 20 °С, которые представлены в работе [12]:

$$K_{c^*}(K_{1c}) = K_{c^*}^{20}(K_{1c}^{20}) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{q_{mp}}, \quad (5)$$

где q_{mp} — постоянная материала, определяемая экспериментально.

Коэффициенты, определенные по стандарту ГОСТ 25.506-85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [12] показаны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты интенсивности напряжений

Марка стали	K_{c^*} , МПа√м	K_{1c} , МПа√м
Ст3	73,3	49
09Г2С	89	60
10Г2С	84	56

Подходы к моделированию динамики развития трещин рассмотрены в работах [13, 14, 15], однако применение такого метода затруднительно ввиду сложности его использования при решении практических инженерных задач.

Таким образом, проведенный обзор показал, что влияние низких температур на развитие трещин в конструкции вагонов-платформ можно оценить методами механики разрушений по коэффициенту интенсивности напряжений.

Целью проведенных исследований было предложить метод и порядок выбора спектра вертикальных нагрузок для проведения испыта-

ний на сопротивление усталости вагонов-платформ, оценить спектр продольных нагрузок с учетом применения поглощающих аппаратов различной энергоемкости, оценив при этом влияние вертикальных и продольных нагрузок на возможность образования трещин в конструкции с учетом отрицательных температур.

Метод выбора спектра вертикальных сил, действующих на вагон-платформу

К вертикальным силам, действующим на вагон, относятся собственная сила тяжести вагона, сила тяжести груза и вертикальная динамическая нагрузка, возникающая при колебаниях вагона на рессорном подвешивании. Напряжения от массы брутто (при загрузке вагона) оценены по результатам испытаний при вертикальном динамическом воздействии и приняты равными амплитудам напряжений при динамической нагрузке, пересчитанным на величину динамической нагрузки от веса груженого кузова вагона по линейной зависимости. Нагрузка оценена по чувствительной схеме согласно стандарту ГОСТ 33788-2016 «Методы испытаний на прочность и динамические качества».

Вертикальное динамическое воздействие и величины напряжений от веса брутто вагона оценены в ходе проведенных испытаний по сбросу с клиньев. При таких испытаниях производится сброс груженого вагона с клиньев (при укладке клиньев высотой 28 мм под все колеса исследуемого вагона, установленного на рельсовой колее) и измерение динамических напряжений, возникающих в конструкции в момент сброса. Величины напряжений от веса брутто груженого вагона σ_{br} определены по формуле:

$$\sigma_{br} = \sigma_a^{sbr} / K_{dv}^{kl}, \quad (6)$$

где σ_a^{sbr} — амплитуда динамических напряжений при сбрасывании вагона с клиньев,

определяемая как полуразность экстремумов динамических напряжений;

K_{dv}^{kl} — отношение показаний (максимальное значение) чувствительной схемы вертикальной нагруженности при сбросе вагона с клиньев к показаниям при подъемке грузевого кузова над тележкой (абсолютное значение).

Затем для каждой зоны, в которой $\sigma_{br} > 0$, вычислены амплитуды $\sigma_{aэ}^{sbr}$, приведенные к симметричному циклу и эквивалентные по повреждающему воздействию полученным при сбросе циклам с учетом постоянно действующих напряжений брутто, по формуле:

$$\sigma_{aэ}^{sbr} = \sigma_a^{sbr} + \sigma_{br} \frac{\bar{\sigma}_{a,N}}{\sigma_B}, \quad (7)$$

где σ_b — предел прочности материала;

$\bar{\sigma}_{a,N}$ — среднее значение предела выносливости в контрольной зоне кузова.

В зонах, где $\sigma_{br} \leq 0$, значения $\sigma_{aэ}^{sbr}$ приняты равными σ_a^{sbr} .

Выбор спектра вертикального нагружения проводился в процессе испытаний реальной конструкции вагона-платформы с длиной по осям сцепления автосцепок 25,47 м, изготовленного из стали 09Г2С с нормируемыми показателями ударной вязкости до температуры -700°C . В контрольных зонах рамы (рис. 1) вагона-платформы и на боковой раме тележки были установлены тензорезисторы для контроля перемещений и напряжений.

В ходе испытаний по сбросу с клиньев вагон-платформа загружался по разным схемам, выбранным из учета максимального нагружения рамы вагона в разных сечениях. Первая схема — два контейнера 1ААА, вторая — четыре контейнера типоразмера 1СС, третья — один контейнер 1ААА, четвертая — два контейнера 1СС и один контейнер 1ААА (рис. 2). Масса контейнеров брутто для каждой схемы выбиралась по максимальным изгибающим моментам, действующим на раму, от вертикальных нагрузок.

Для оценки спектра продольного нагружения проведены исследования номинальной и максимальной энергоемкости поглощающих аппаратов фрикционного типа, изготовленных по российскому стандарту ГОСТ 32913-2014, заявленной номинальной энергоемкостью 70 кДж и 100 кДж. Для проведения испытаний были использованы два грузовых вагона, загруженных до максимальной массы брутто 94 т. На один вагон, стоящий в свободном незаторможенном состоянии, поочередно устанавливались испытываемые поглощающие аппараты. На второй вагон устанавливался серийно изготавливаемый поглощающий аппарат энергоемкостью 70 кДж. Испытания проводились путем соударения двух типовых грузовых вагонов. При испытаниях сила соударения вагонов контролировалась динамометрической

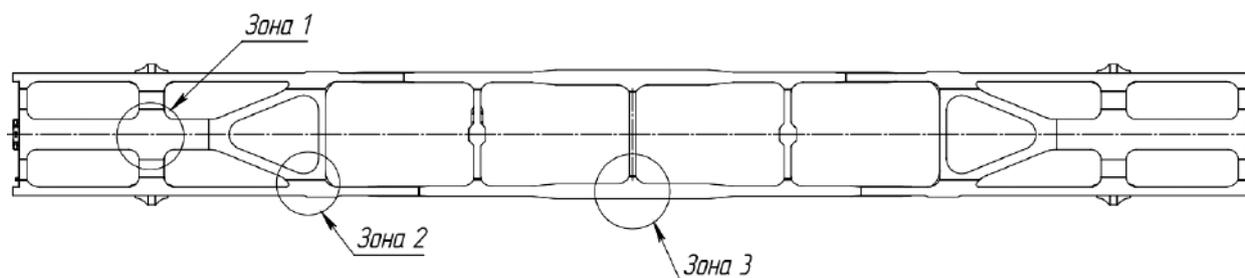


Рис. 1. Контрольные зоны рамы вагона-платформы

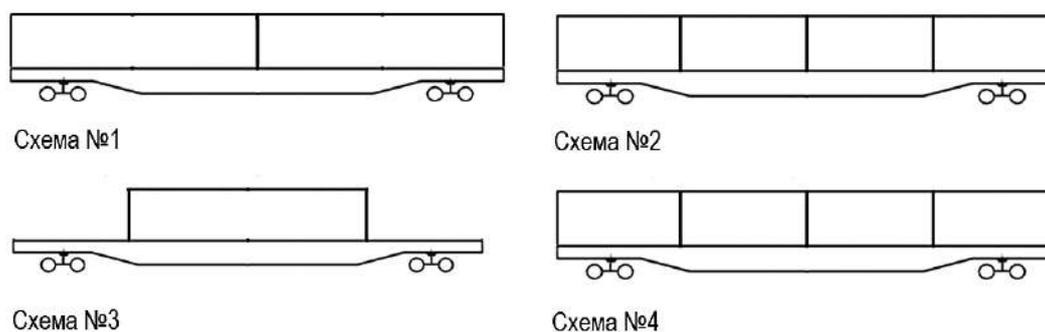


Рис. 2. Схемы нагружения вагона-платформы при сбросе с клиньев

автосцепкой, а ход поглощающего аппарата — датчиком перемещения.

Аналогичным способом (путем соударения двух вагонов) были оценены максимальные напряжения в конструкции вагона-платформы увеличенной длины при максимально допускаемой в эксплуатации скорости соударения 15 км/ч.

Максимальные значения перемещений в местах установки тензодатчиков, полученные при испытаниях по сбросу с клиньев и соударении вагонов, использовались в качестве граничных условий для оценки коэффициентов интенсивности напряжений в контролируемых зонах при действии вертикальных сил. Оценка проводилась методом конечных элементов, путем вычисления J-интеграла в широко известном программном комплексе ANSYS [11].

Значения полученных коэффициентов интенсивности напряжений по формуле (5) сравнивались с пороговыми значениями, полученными с помощью зависимости (5) для температуры -60°C , с использованием данных табл. 1.

Результаты исследований

Проведенные испытания реальных конструкций вагонов-платформ увеличенной длины показали, что, несмотря на все многообразие схем нагружения вагона, при исполь-

зовании метода оценки спектра вертикального нагружения при сбросе с клиньев возможно выбрать схему нагружения вагона, практически максимально загружающую все его сечения. Результаты показаны в табл. 3. Из нее следует, что наихудшей стала схема № 4 установки двух контейнеров 1СС, 1С, 1СХ и одного контейнера 1ААА, 1АА, 1А, 1АХ.

Результаты испытаний на соударение в рассматриваемых зонах рам вагона-платформы увеличенной длины для тех же схем представлены в табл. 4.

Определенные на основании экспериментальных данных коэффициенты интенсивности напряжений в исследуемых зонах представлены на рис. 3 и 4. Из графиков видно, что первоначальный рост трещин при пороговом значении коэффициента интенсивности напряжений для температуры -60°C в зоне 3 (рис. 1) возможен под действием вертикальных нагрузок, в то время как в зонах 1 и 2 (рис. 1) первоначальный рост трещин происходит под действием продольных нагрузок.

Результаты исследования номинальной и максимальной энергоемкостей поглощающих аппаратов фрикционного типа, изготовленных по российскому стандарту ГОСТ 32913-2014, заявленной номинальной энергоемкостью 70 кДж и 100 кДж показаны на рис. 5 и 6.

ТАБЛИЦА 3. Напряжения в исследуемых зонах рамы от вертикальных нагрузок

Схема для сброса с клиньев	Динамические напряжения в исследуемых зонах σ_{\max} (σ_{\min}), МПа		
	Зона 1	Зона 2	Зона 3
Схема № 1: два контейнера 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	18 (-15)	14 (-13)	29 (-20)
Схема № 2: четыре контейнера 1CC, 1C, 1CX	-7 (6)	15 (-20)	21 (-26)
Схема № 3: один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	-7 (2)	20 (-11)	15 (-6)
Схема № 4: два контейнера 1CC, 1C, 1CX и один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	18 (-14)	21 (-14)	33 (-22)

ТАБЛИЦА 4. Напряжения в исследуемых зонах рамы от продольных нагрузок

Схема для соударения	Динамические напряжения в исследуемых зонах σ_{\max} (σ_{\min}), МПа		
	Зона 1	Зона 2	Зона 3
Схема № 1: два контейнера 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	28 (-71)	38 (-29)	41 (-37)
Схема № 2: четыре контейнера 1CC, 1C, 1CX	32 (-84)	33 (-39)	27 (-84)
Схема № 3: один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	-10 (-58)	12 (-30)	24 (-34)
Схема № 4: два контейнера 1CC, 1C, 1CX и один контейнер 1AAA, 1AA, 1A, 1AX	30 (-74)	40 (-33)	43 (-39)

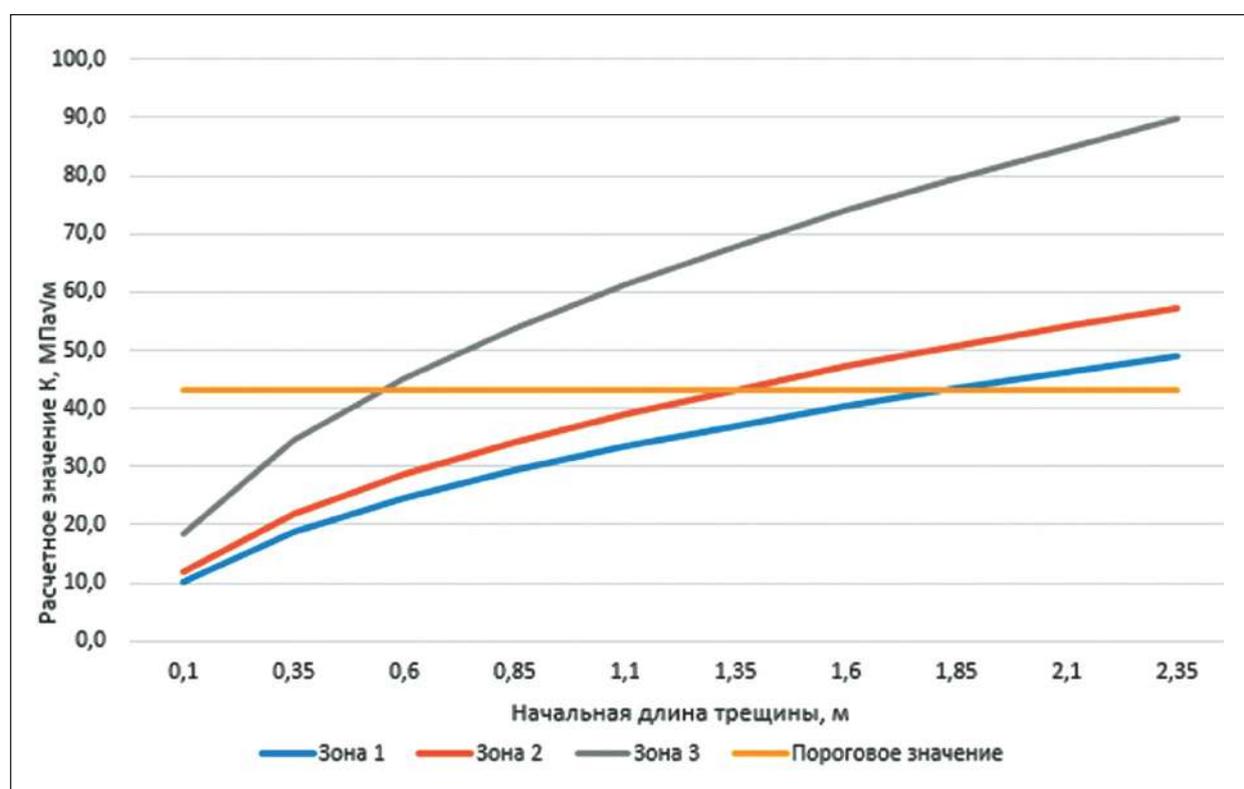


Рис. 3. График зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины при вертикальном нагружении

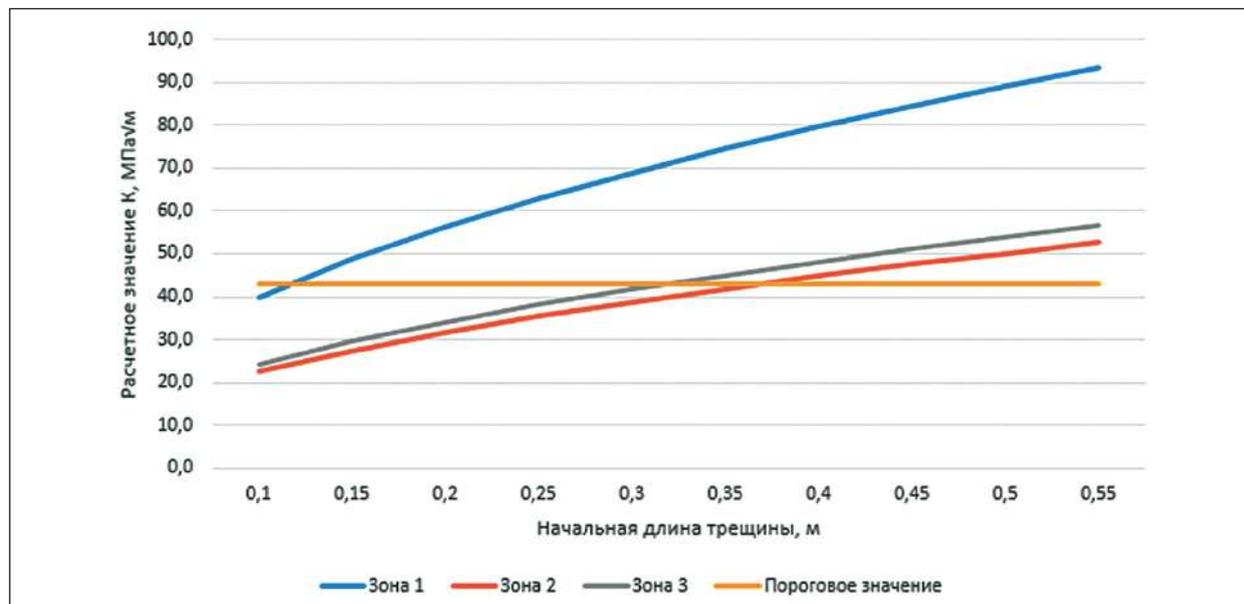


Рис. 4. График зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины при продольном нагружении

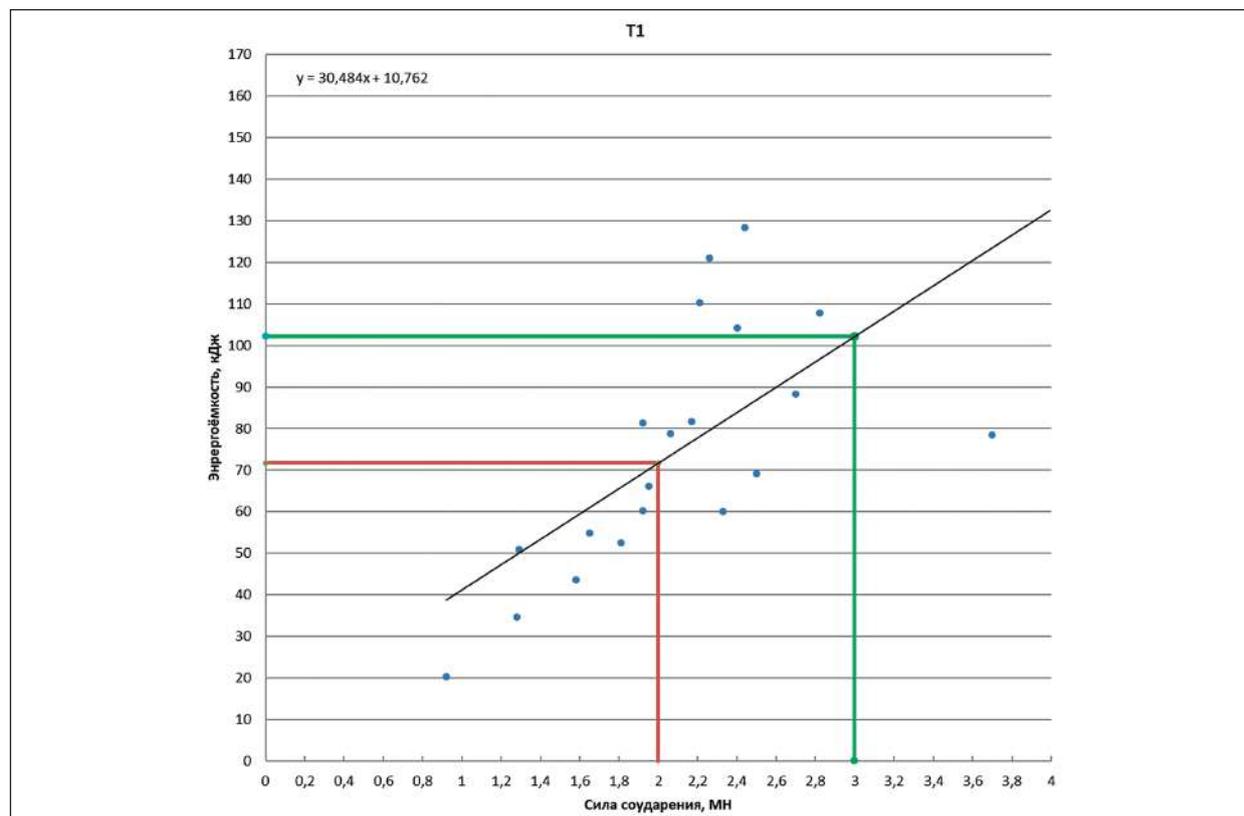


Рис. 5. Результаты испытаний поглощающего аппарата с заявленной номинальной энергоёмкостью 70 кДж

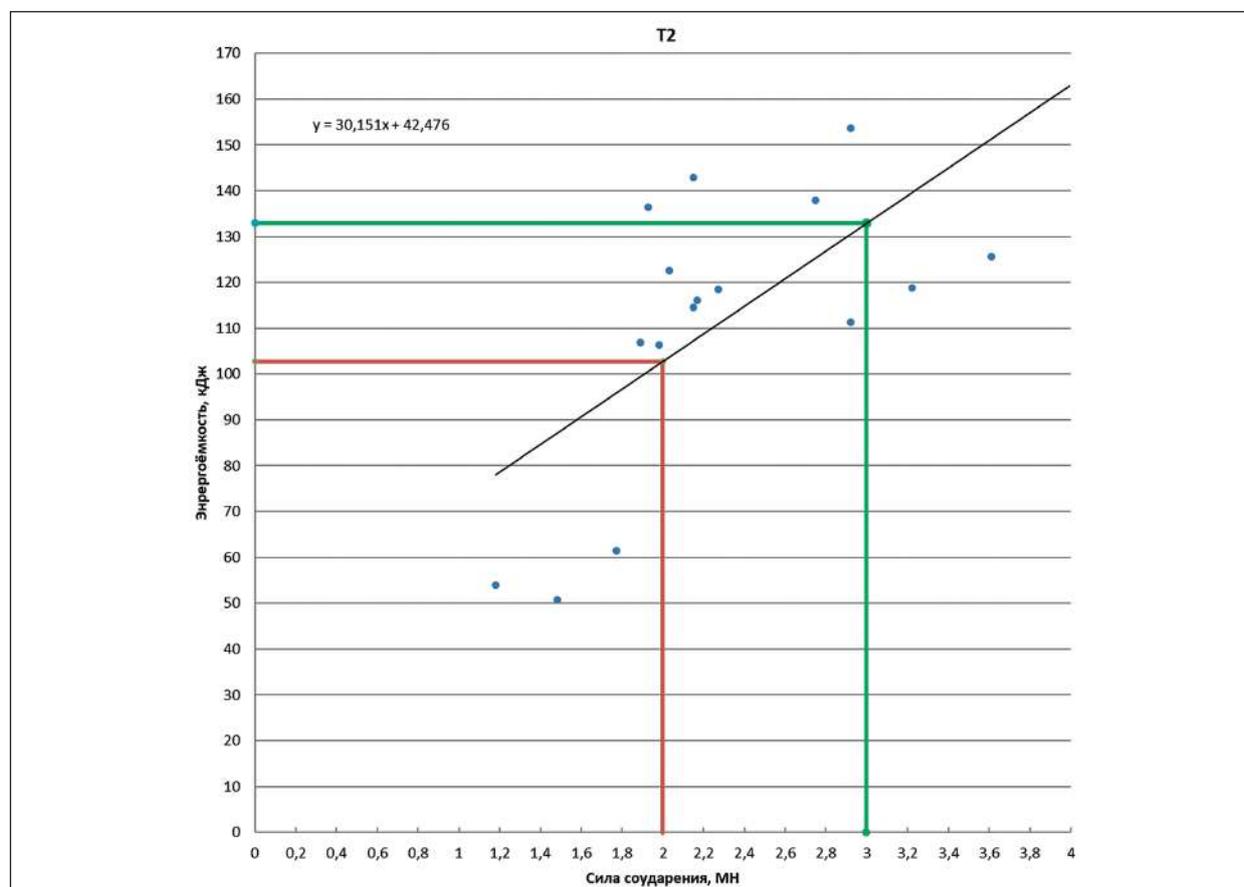


Рис. 6. Результаты испытаний поглощающего аппарата с заявленной номинальной энергоемкостью 100 кДж

Основываясь на полученных данных испытаний поглощающих аппаратов, получен фактический спектр продольного нагружения вагонов, оборудованных поглощающими аппаратами энергоемкостью более 100 кДж (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Фактический спектр продольного нагружения вагонов

Среднее значение силы в интервале, МН	Число приложений силы за 1 год	
	растягивающей	сжимающей
0,175	2540	0,126
0,42	5760	0,285
0,7	5660	0,28
0,98	3700	0,183
1,26	1554	0,077
1,54	725	0,036
1,82	202	0,0102
2,1	48	0,0024
2,38	6	0,0003

Анализ результатов

Предложенный метод оценки спектра вертикального нагружения вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров позволяет из множества разнообразных вариантов схем загрузки вагона выбрать для проведения испытаний одну, по которой максимально нагружаются все его потенциально опасные зоны.

По определенным на основании предложенного метода экстремумам напряжений в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины установлено, что в качестве схемы испытаний для экспериментальной оценки показателей сопротивления усталости при вертикальных и продольных нагрузках возможно использовать одну обоснованную схему, которая максимально нагружает все зоны вагона.

Определенные коэффициенты интенсивности напряжений, полученные на основании экспериментально определенных экстремумов напряжений, показали, что в конструкции вагонов-платформ увеличенной длины для перевозки контейнеров возможен рост трещин при отрицательных температурах, что не согласуется с методикой оценки усталостной прочности, приведенной в ГОСТ 33211-2014.

По предложенной методике возможно установить размер допустимого трещиноподобного дефекта, исходя из условий начального роста трещины. Для реально испытанной конструкции вагона допустимая величина дефекта (начальной трещины) из условия экстремумов напряжений от вертикальных нагрузок при действии отрицательных температур составила 0,54 мм, а из условия экстремумов напряжений от действия продольных нагрузок — 0,12 мм.

Для снижения коэффициентов интенсивности напряжений в конструкциях вагонов-платформ при действии продольных нагрузок

предлагается в условиях отрицательных температур на вагонах использовать только поглощающие аппараты энергоемкостью не менее 100 кДж (класса Т2 по ГОСТ 32913-2014).

При этом условия работы поглощающих аппаратов в условиях отрицательных температур подлежат дальнейшему исследованию.

Заключение

Отдельные результаты исследований использованы при разработке специалистами ФГБОУ ВО «ПГУПС» типовой методики испытаний на сопротивление усталости вагонов-платформ увеличенной длины [16], утвержденной ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
2. Bityutsky A. A. Analysis of supporting body structure freight cars fatigue resistance estimation methods development // Research of fatigue resistance bonds and data selection of new freight cars characteristics / ed. by A. A. Bityutskiy; Railcar-building Engineering Center. Edition 7. St. Petersburg: OM-Press, 2009. P. 6–13.
3. Мыльников В. В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 5. С. 427–435.
4. Fatigue resistance changes of structural steels at different load spectra / V. V. Myl'nikov [et al.] // Steel in translation. 2019. Vol. 49, No. 10. P. 678–682.
5. Беспалько С. В., Козлов М. П. Комплексный подход к оценке параметров поглощающих аппаратов автосцепного оборудования подвижного состава железных дорог // Современные проблемы железнодорожного транспорта: сб. тр. по результатам междунар. интернет-конф. (Москва,

7 апреля 2020 года) / под общ. ред. К. А. Сергеева. М.: Российский университет транспорта, 2020. С. 192–195.

6. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

7. Матвиенко Ю. Г. Упрощенный вероятностный метод оценки коэффициентов запаса (безопасности) по трещиностойкости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 3. С. 22–30.

8. Matvienko Yu. G. The simplified approach for estimating probabilistic safety factors in fracture mechanics // Eng. Fail. Anal. 2020. Vol. 117. Art. 104814.

9. Соколов С. А., Грачев А. А., Васильев И. А. Анализ прочности элемента конструкции с трещиной в условиях отрицательных климатических температур // Вестник машиностроения. 2019. № 11. С. 42–46.

10. Vadholm T. Investigation of low temperature toughness and crack initiation in welded structural steels. Norwegian University of Science and Technology, 2014.

11. Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С. ANSYS в руках инженера: механика разрушения. Изд. 2-е, испр. М.: ЛЕНАНД, 2010. 456 с.

12. Зайнуллин Р. С., Харисов Р. А., Мухаметзянов А. Н. Оценка влияния низких температур на трещиностойкость сталей, применяемых в нефтегазовой отрасли // Нефтяное хозяйство. 2017. № 10. С. 116–119.

13. Ignatiev M. O., Petrov Y. V., Kazarinov N. A. Simulation of dynamic crack initiation based on the peridynamic numerical model and the incubation time criterion // Technical Physics. 2021. No. 66(3). P. 422–425.

14. Ignatev M., Kazarinov N., Petrov Y. Peridynamic modelling of the dynamic crack initiation // Procedia Structural Integrity. 2020. No. 28. P. 1650–1654.

15. Smirnov V. I. Fracture assessment diagram for solid with circular crack subjected to concentrated forces // Materials Physics and Mechanics. 2017. No. 31(1–2). P. 71–74.

16. Вагоны-платформы увеличенной длины. Типовая методика испытаний на сопротивление усталости, утв. 05.05.2023 заместителем генерального директора — главным инженером ОАО «РЖД» А. М. Храпцовым.

Дата поступления: 23.07.2024

Решение о публикации: 01.09.2024

Контактная информация:

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; tcyganskaya@gmail.com

СМИРНОВ Анатолий Николаевич — доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; smirnovnvc@mail.ru

БЕЙН Дмитрий Григорьевич — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора; dgbain@mail.ru

Selection of loading schemes for assessing the fatigue resistance of frame elements of flat cars

L. V. Tsyganskaya¹, A. N. Smirnov¹, D. G. Bein²

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

² Joint Stock Company “Scientific Research Center “Vagony”, room 5N, 1st floor, litera M, 22, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Tsyganskaya L.V., Smirnov A.N., Bein D.G.* Selection of loading schemes for assessing the fatigue resistance of frame elements of flat cars // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 787–800. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-787-800

Abstract

Purpose: traffic safety is a priority goal for the railway industry. The existing problem of cracks periodically detected during operation in the structures of flat cars requires new approaches to the theoretical and practical assessment of the fatigue resistance and crack resistance of their structures. The problem of crack formation under low temperature conditions is of particular relevance. **Methods:** an experimental method has been developed for determining the spectrum of vertical loading of platform cars for transporting containers and the spectrum of longitudinal loads for cars operating in areas with low temperatures has been substantiated; a method for assessing crack resistance based on stress extrema determined experimentally has been proposed. The method is based on the principles of fracture mechanics, which take into account the influence of negative temperatures. **Results:** based on the stress extremes in the design of extended-length platform cars, determined on the basis of the proposed method, it was established that it is possible to use one well-founded scheme that maximally loads all zones of the car as a test scheme for experimental assessment of fatigue resistance indicators under vertical and longitudinal loads. Using the proposed method, it is possible to determine the size of an acceptable crack-like defect based on the conditions of the initial crack growth. Stress intensity factors obtained on the basis of experimentally determined stress extrema showed that in the design of flatcars of increased length for transporting containers, crack growth is possible at subzero temperatures, which is not consistent with the methodology for assessing fatigue strength of the GOST 33211-2014 standard. **Practical significance:** the proposed method for assessing the spectrum of vertical loading of flatcars of increased length for the transportation of containers allows, from a variety of options for car loading schemes, to select one scheme for testing, which maximally loads all its potentially dangerous zones. Some research results were used to develop a standard test method for fatigue resistance of extended-length flat cars.

Keywords: flat cars, fatigue resistance safety factor, crack resistance, load spectrum

References

1. Kogaev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost': spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1985. 224 s. (In Russian)
2. Bityutsky A.A. Analysis of supporting body structure freight cars fatigue resistance estimation methods development // Research of fatigue resistance bonds and data selection of new freight cars characteristics / ed. by A.A. Bitiutskiy; Railcar-building Engineering Center. Edition 7. St. Petersburg: OM-Press, 2009. P. 6–13.
3. Myl'nikov, V. V. Vliyanie chastoty nagruzheniya na ustalost' konstrukcionnyh materialov // *Nauka i tekhnika*. 2019. T. 18, No. 5. S. 427–435. (In Russian)
4. Fatigue resistance changes of structural steels at different load spectra / V. V. Myl'nikov [et al.] // *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49, No. 10. P. 678–682.
5. Bespal'ko S.V., Kozlov M.P. *Kompleksnyj podhod k ocenke parametrov pogloshchayushchih*

apparator avtoscepnogo oborudovaniya podvizhnogo sostava zheleznyh dorog // *Sovremennye problemy zheleznodorozhnogo transporta: sb. tr. po rezul'tatam mezhdunar. internet-konf. (Moskva, 7 aprelya 2020 goda) / pod obshch. red. K.A. Sergeeva. M.: Rossijskij universitet transporta, 2020. S. 192–195. (In Russian)*

6. Mahutov N.A. Deformacionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstrukcij na prochnost'. M.: Mashinostroenie, 1981. 272 s. (In Russian)

7. Matvienko Yu. G. Uproshchennyj veroyatnostnyj metod ocenki koefitsientov zapasa (bezopasnosti) po treshchinostojkosti // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2021. No. 3. S. 22–30. (In Russian)*

8. Matvienko Yu.G. The simplified approach for estimating probabilistic safety factors in fracture mechanics // *Eng. Fail. Anal. 2020. Vol. 117. Art. 104814.*

9. Sokolov S.A., Grachev A.A., Vasil'ev I.A. Analiz prochnosti elementa konstrukcii s treshchinoj v usloviyah otricatel'nyh klimaticheskikh temperatur // *Vestnik mashinostroeniya. 2019. No. 11. S. 42–46. (In Russian)*

10. Vadholm T. Investigation of low temperature toughness and crack initiation in welded structural steels. Norwegian University of Science and Technology, 2014

11. Morozov E. M., Mujzemnek A. Yu., SHadskij A.S. ANSYS v rukah inzhenera: mekhanika razrusheniya. Izd. 2-e, ispr. M.: LENAND, 2010. 456 s. (In Russian)

12. Zajnullin R. S., Harisov R. A., Muhametzyanov A.N. Ocenka vliyaniya nizkikh temperatur na

treshchinostojkost' stalej, primenyaemyh v neftegazovoj otrasli // *Neftyanoe hozyajstvo. 2017. No. 10. S. 116–119. (In Russian)*

13. Ignatiev M.O., Petrov Y.V., Kazarinov N.A. Simulation of dynamic crack initiation based on the peridynamic Nnerical model and the incubation time criterion // *Technical Physics. 2021. No. 66(3). P. 422–425.*

14. Ignatev M., Kazarinov N., Petrov Y. Peridynamic modelling of the dynamic crack initiation // *Procedia Structural Integrity. 2020. No. 28. P. 1650–1654.*

15. Smirnov V. I. Fracture assessment diagram for solid with circular crack subjected to concentrated forces // *Materials Physics and Mechanics. 2017. No. 31(1–2). P. 71–74.*

16. Vagony-platformy uvelichennoj dliny. Tipovaya metodika ispytanij na soprotivlenie ustalosti, utv. 05.05.2023 zamestitelem general'nogo direktora — glavnym inzhenerom OAO «RZHD» A. M. Hramcovym. (In Russian)

Received: 23.07.2024

Accepted: 01.09.2024

Author's information:

Lyudmila.V. TSYGANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor of Departament of Railway Cars; tcyganskaya@gmail.com

Anatolii N. SMIRNOV — Associate Professor of Departament of Railway Cars; smirnovnvc@mail.ru

Dmitrii G. BEIN — PhD in Engineering, deputy chief designer; dgbain@mail.ru

УДК 629.423.1

Разработка способа подвода тока к плечам выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов для электровозов серии «Ермак»

В. Н. Знаенко

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Для цитирования: Знаенко В.Н. Разработка способа подвода тока к плечам выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов для электровозов серии «Ермак» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 801–813. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-801-813

Аннотация

Цель: разработать способ подвода тока, обеспечивающий его равномерное распределение по параллельным ветвям плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств для электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом. **Методы:** построена подключенная через управляемый силовой ключ к источнику питания физическая модель четырехтранзисторного плеча ВИП, на которой проводился анализ распределения токов при различных способах его подвода к параллельным ветвям. **Результаты:** получены и проанализированы диаграммы распределения токов по параллельным ветвям плеча при различных способах подвода тока, исследовано влияние топологии подключения силовых шин плеча на параметры цепи. Разработан способ подвода тока к плечу ВИП, обеспечивающий разброс токов по ветвям не более 5%. **Практическая значимость:** результаты могут использоваться при построении ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов серии «Ермак», что позволит увеличить пропускную и провозную способность тяговых участков Восточного полигона.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзисторы, параллельное соединение, работоспособность, выравнивание токов

Введение

Энергоэффективность и энергосбережение относятся к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации [1]. По данному направлению учеными Иркутского государственного университета путей сообщения разработан выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП) на базе IGBT-транзисторов для современных отечественных электровозов переменного тока. Его внедрение на тяговый подвижной состав позволит электровозам работать

с коэффициентом мощности 0,95 в режимах тяги и рекуперативного торможения, что значительно превышает энергетические показатели электровозов с тиристорным ВИП (рис. 1) [2, 3].

С применением ВИП на базе IGBT-транзисторов втрое снизятся просадки и искажения напряжения в контактной сети (КС) при пропуске тяжеловесных поездов [4, 5]. Это позволит без усиления системы электроснабжения сократить межпоездной

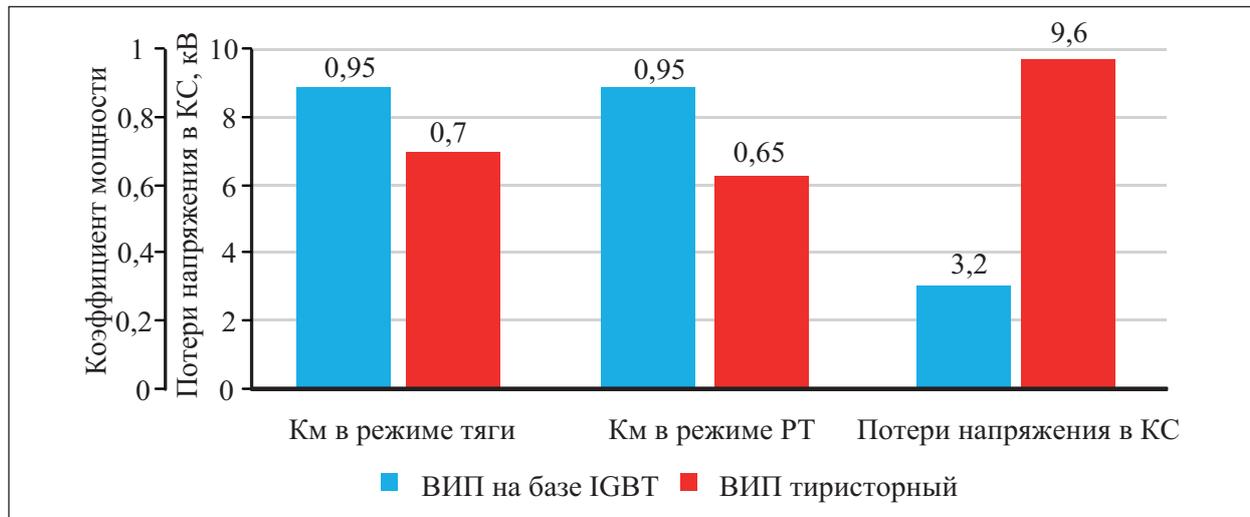


Рис. 1. Диаграмма сравнения показателей электровозов с ВИП на базе тиристоров и IGBT-транзисторов

интервал, увеличить количество пар поездов на участке, эффективнее использовать технологию «Виртуальная сцепка», что сегодня особенно важно в условиях постоянного увеличения грузооборота по железнодорожным магистралям.

Актуальным является рассмотрение вопросов построения ВИП на базе IGBT-транзисторов. Одна из важнейших задач — разработка конструкции плеча преобразователя с параллельным соединением IGBT-транзисторов.

Параллельное соединение силовых полупроводниковых приборов выполняется с целью обеспечить безотказное протекание по плечу ВИП тока необходимой величины. Их количество определяется по формуле (1):

$$m = \frac{I}{I_n \cdot k_I}, \quad (1)$$

где I — ток плеча преобразователя, А;

I_n — предельный ток полупроводника, А;

k_I — коэффициент использования полупроводников по току.

Разработчики при построении преобразователей для различных нужд предпочитают

соединять параллельно не более двух IGBT-транзисторов. Однако их мощность лимитирована, тогда появляется необходимость увеличивать количество параллельных ветвей, при этом нужно решить задачу обеспечения равномерного распределения токов по параллельным ветвям.

Способы выравнивания токов

Используя опыт отечественной практики построения преобразователей электровозов переменного тока, рассмотрим технические решения, направленные на выравнивание токов [6–12].

Одним из таких решений является подбор полупроводников по ВАХ [6–8]. Для этого их подразделяют на группы в зависимости от суммарной величины падения напряжения при предельном токе и токе 0,25 либо 0,5 от предельного. Способ подбора является трудозатратным, имеет зависимость от человеческого фактора и создает необходимость иметь значительный резерв полупроводников.

Другим приемом снижения неравномерности распределения токов является

ся включение последовательно в каждую параллельную ветвь специальных выравнивающих устройств — индуктивных делителей [9–12]. Различают индуктивные делители без магнитной связи (рис. 2а) и с магнитной связью (рис. 2б).

Делитель тока с магнитной связью работает следующим образом: при неравенстве токов в параллельных ветвях в сердечнике делителя наводится магнитный поток Φ , генерирующий в обмотке делителя с меньшей величиной тока ЭДС e_k , которая суммируется с падением напряжения на полупроводнике, улучшая потенциальные условия для протекания тока:

$$e_k = \frac{d\Phi}{dt} \cdot 2\omega, \quad (2)$$

где $d\Phi/dt$ — скорость изменения магнитного потока, Вб/с;

ω — количество витков обмотки делителя.

Преимущество делителей с магнитной связью заключается в том, что магнитный поток в сердечниках возбуждается только при разности токов в параллельных ветвях, однако их применение значительно увеличивает габариты преобразователя, именно поэтому такое решение не применяется в мощных установках. К тому же при выходе из строя одного из полупроводников работа схемы выравнивания нарушается.

Делители без магнитной связи обладают достаточно малыми размерами и позволяют применять их при большом количестве параллельных ветвей. Принцип действия основан на том, что с помощью катушек индуктивности в каждую параллельную ветвь вводится добавочная выравнивающая ЭДС e_k , пропорциональная скорости изменения тока i_k данной ветви:

$$e_k = L \cdot \frac{di_k}{dt}, \quad (3)$$

где L — индуктивность делителя, Гн;

di_k/dt — скорость изменения тока, А/с.

Недостаток использования индуктивных делителей заключается в увеличении нежелательной индуктивности цепи и снижении КПД преобразователя, вызванном дополнительными потерями на делителях.

Перечисленные выше решения дорабатывались, совершенствовались в ходе испытаний и опытной эксплуатации тиристорных преобразователей на электровозах переменного тока и сегодня учтены в конструкции современных локомотивов, например, в ВИП-4000М и ВУВ-24 электровозов серии «Ермак» [13]. Известно, что надежность данных преобразователей находится на удовлетворительном уровне. Абсолютно противоположная ситуация с их энергоэффективностью, которая сегодня

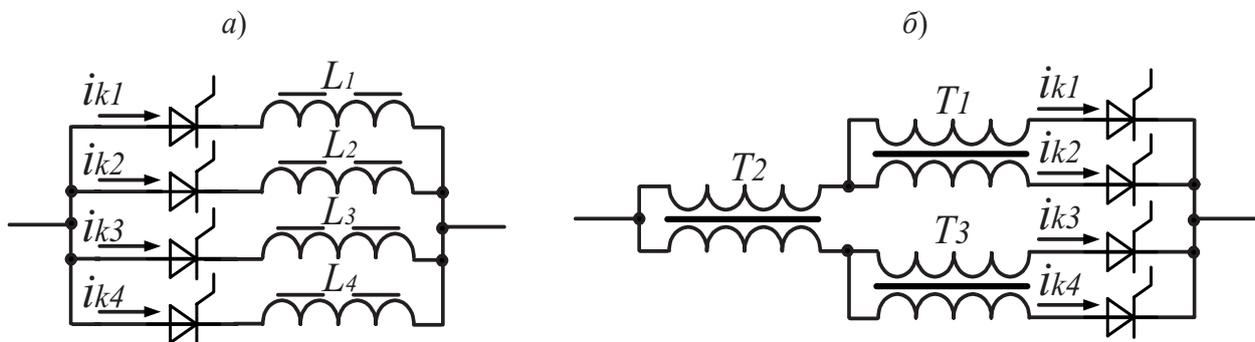


Рис. 2. Принципиальные схемы включения в цепь параллельных СПП индуктивных делителей:

а — без магнитной связи; б — с магнитной связью

сдерживает передовые технические решения пропуска поездов и обусловлена устаревшей силовой базой — тиристорами. Переход на полностью управляемые полупроводники (IGBT-транзисторы) продиктован временем. При их внедрении вопросы неравномерности распределения токов по параллельным ветвям обязательно должны учитываться, как и разрабатываться новые технические решения, учитывающие особенности работы IGBT-транзисторов в коллекторных приводах отечественных электровозов.

Основной грузооборот на Восточном полигоне осуществляется электровозами серии «Ермак», в большинстве которых к ВИП подключено параллельно два тяговых электродвигателя (ТЭД). Согласно формуле (1) в плече необходимо предусмотреть четыре параллельные ветви (рис. 3). Применение IGBT-транзисторов обуславливает быстротечность коммутационных процессов, что

обостряет проблему выравнивания токов по параллельным ветвям плеча. Включение индуктивных делителей в цепь не является для них эффективным, так как приводит к дополнительным перенапряжениям IGBT-транзисторов, способствуя их пробоем. Идентичность ВАХ для параллельно соединенных ветвей обеспечивается подбором IGBT-транзисторов из одной партии уже на заводе, при их изготовлении и сборке. Однако, как показывает практика, этого далеко не достаточно. На симметрию токов значительно влияет топология подключения силовых шин. Целью данной работы является разработка способа подвода тока, обеспечивающего его равномерное распределение по параллельным ветвям плеча ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств.

Для этого в лаборатории ИрГУПС была построена модель плеча ВИП с четырьмя па-

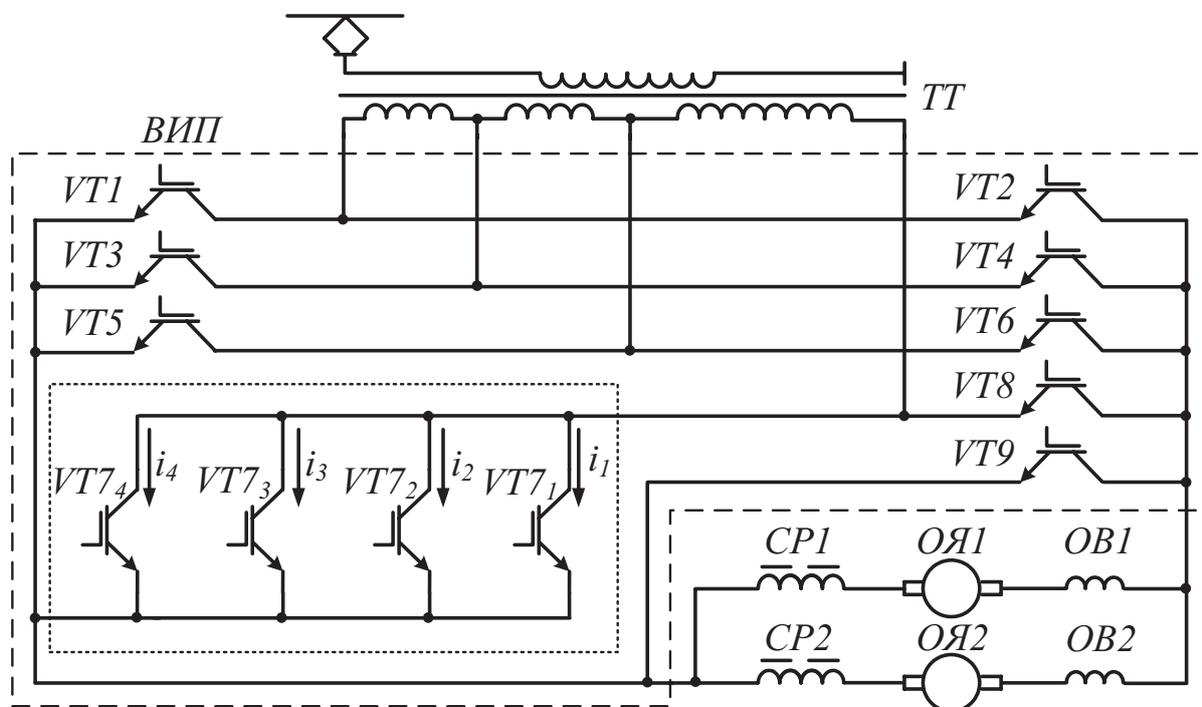


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема тележки электровоза с ВИП на базе IGBT-транзисторов

раллельными ветвями. К модели плеча прикладывается постоянное напряжение, фиксируется изменение токов по ветвям в течение периода проводящего состояния, после чего анализируются полученные кривые. Чтобы исключить влияние на распределение токов таких факторов, как разброс ВАХ и задержки в цепях управления, ветви плеча выполнены из медных проводников с сохранением геометрических размеров, аналогичных преобразователю электровоза. На каждой ветви модели плеча закреплены пояса Роговского Т1–Т4, фиксирующие изменение токов i_1 – i_4 в соответствующей ветви. Сигнал с поясов преобразуется и выводится на цифровой осциллограф Tektronix TDS 2024C. Так как пояс Роговского фиксирует только изменение тока, то есть лишь моменты открытия и запираания модели плеча, то для получения диаграмм протекания токов в течение всего периода проводящего состояния плеча сигнал с них преобразуется интегратором. Предварительно все пояса апробированы на одном проводнике, подтверждено отсутствие расхождений при

измерении. В целях исключения помех подвод сигнала от поясов Роговского выполнен из коаксиального кабеля. Моделирование открытия и запираания плеча выполняется с помощью силового ключа VT , выполненного на базе MOSFET-транзистора IRF3205. Разработанная принципиальная схема исследования влияния конструкции подвода тока на распределение токов по параллельным ветвям приведена на рис. 4.

Исследование распределения токов по параллельным ветвям плеча при различных способах его подвода

Из существующего уровня техники известны диагональный и односторонний способы подводы тока [14]. Диагональный способ предполагает подключение токоведущих шин к первой и последней параллельным ветвям плеча. Упрощенно подвод тока представлен в схеме плеча $VT7$ на рис. 3. При одностороннем способе токоведущие шины подключены к коллекторному и эмиттерному выводам одной крайней ветви. Упрощенное графическое

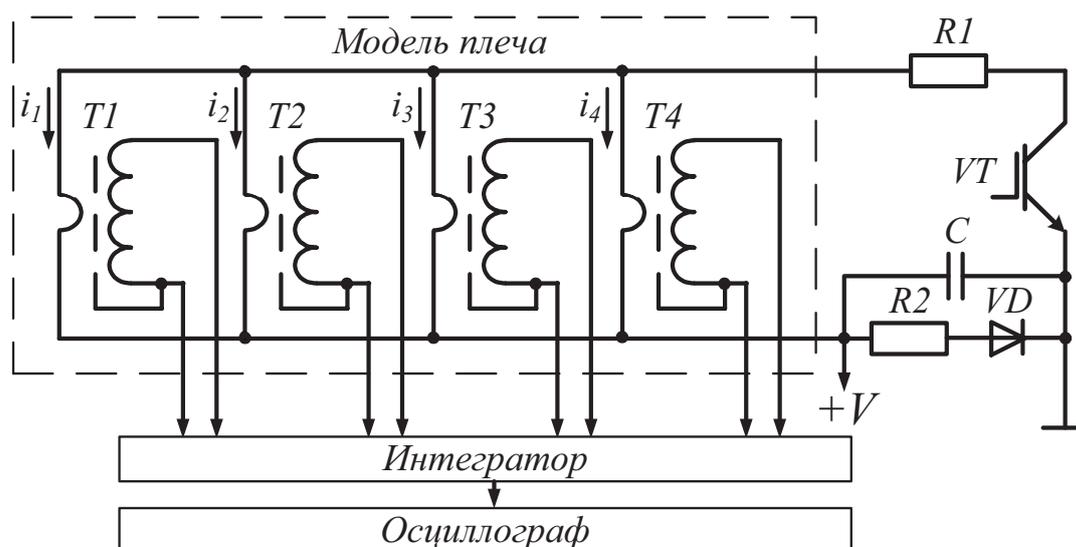


Рис. 4. Принципиальная схема для исследования влияния конструкции подвода тока на распределение токов

изображение одностороннего подвода тока представлено в модели плеча на рис. 4. Результаты моделирования при диагональном и одностороннем способах подвода тока представлены на рис. 5а и 5б соответственно.

Из рис. 5а видно, что односторонний подвод тока демонстрирует неудовлетворительное распределение токов по параллельным ветвям, разброс токов превышает 96%. Приближенная к подводу тока ветвь 4 является перегруженной, ток i_4 по величине больше силы тока остальных ветвей в сумме более чем в два раза.

Диагональный подвод тока, исходя из представленных на рис. 5б результатов, также не является оптимальным, разброс между ветвями составляет 55%. Значительная часть тока приходится на крайние ветви 1 и 4 при недоиспользовании ветвей 2 и 3.

Из результатов опытов очевидно, что на распределение токов по параллельным ветвям влияет путь его прохождения, и чем более удалены ветви от точки подвода тока, тем меньшим значением характеризуется величина тока в них. Тогда исходя из предположения, что равенство токов может быть достигнуто при равноудаленном расстоянии всех параллельных ветвей от точки подвода тока, собрана модель плеча, предполагающая расположение парал-

лельных ветвей «по кругу» с подводом тока в центре. Подобное решение предложено в работе [15] для дискретных IGBT-транзисторов. Для обеспечения равноудаленного расстояния всех ветвей от точки подвода тока необходимо осуществить переход от рассмотрения модели плеча на плоскости к модели плеча в пространстве. Упрощенный вид модели плеча и диаграммы распределения токов по ветвям представлены на рис. 6а и 6б соответственно.

На рис. 6б можем наблюдать распределение токов с меньшей неравномерностью в сравнении с диагональным и односторонним способами его подвода. При этом полученный результат также нельзя считать удовлетворительным, так как величина разброса токов достигает 39%. Таким образом, симметрия токов не обеспечивается даже при равноудаленном положении ветвей от точки подвода, хотя, на первый взгляд, достижение симметрии токов было очевидным. Чтобы определить причину разброса токов, необходимо более детально рассмотреть связанные с конструкцией плеча факторы, определяющие величину тока по ветвям. Для этого рассмотрим каждую параллельную ветвь плеча как отдельный контур, в котором протекает советующий ток i_1-i_4 . Величина тока в контуре будет зависеть от

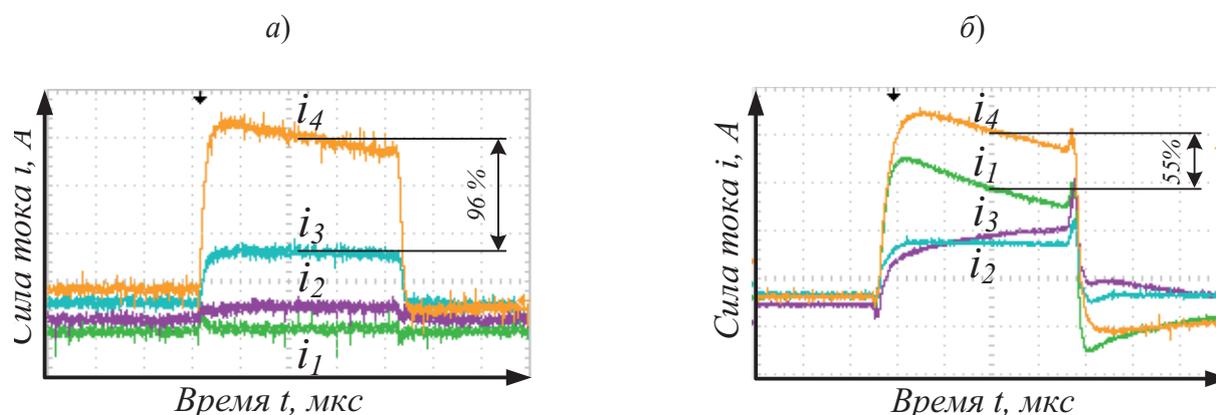


Рис. 5. Диаграммы протекания токов по модели плеча:

а — при одностороннем подводе тока; б — при диагональном подводе тока

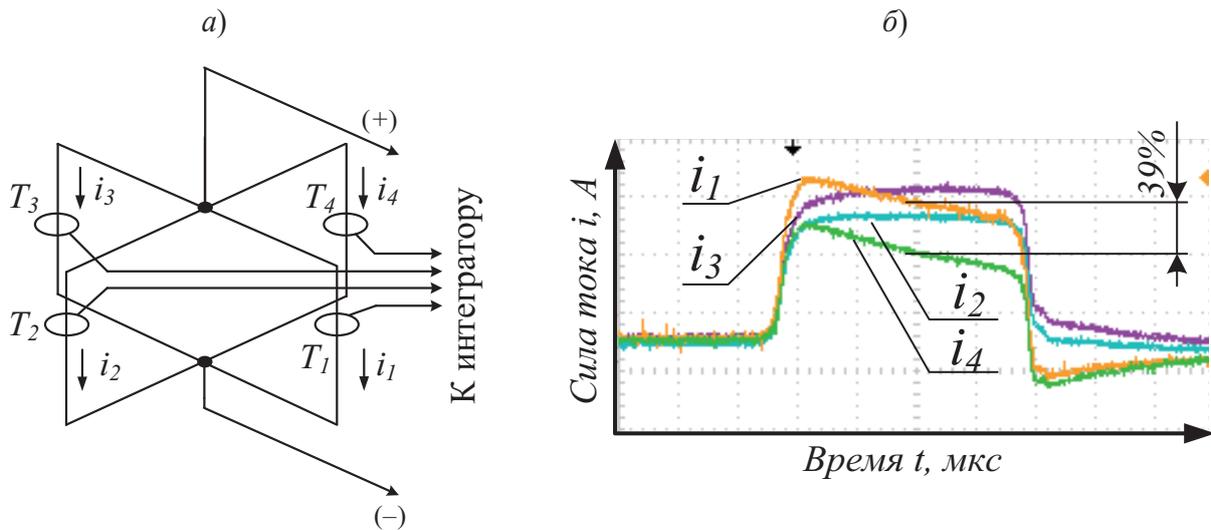


Рис. 6. Моделирование равноудаленного подвода тока:
 а — модель плеча; б — диаграммы протекания токов

прикладываемого напряжения и импеданса в цепи. Под импедансом подразумевается активное сопротивление и индуктивность контура. Так как по условиям моделирования все ветви выполнены идентично и расположены равноудаленно от точки подвода тока, активное сопротивление контуров равно, так же как и прикладываемое к ним напряжение. В конкретном случае решающим фактором, влияющим на величину тока, является индуктивность контура, которая складывается из собственной (L) и взаимной (M) между контурами индуктивностей (рис. 7а). Индуктивность может быть определена по следующим формулам, взятым из источника [16]:

$$L_n = \Psi_{L_n} / i_n, \tag{4}$$

$$M_{mn} = \Psi_n / i_m; \quad M_{mn} = \Psi_m / i_n, \tag{5}$$

где L_n — собственная индуктивность контура n , Гн;

M_{mn} — взаимная индуктивность контура n от контура m , Гн;

M_{mn} — взаимная индуктивность контура m от контура n , Гн;

Ψ_{L_n} — поток самоиндукции контура n , Гн;

$i_m i_n$ — токи в контурах n и m , А;

Ψ_m, Ψ_n — потоки взаимной индукции контуров n и m соответственно, обусловленные токами $i_m i_m$, Вб.

При постоянном, а также при переменном токе низкой частоты под потоком индукции контура понимают величину:

$$\Psi = \frac{1}{s} \int \Phi ds, \tag{6}$$

где ds — элемент площади s поперечного сечения провода;

Φ — магнитный поток, Вб.

Магнитный поток определяется равенством:

$$\Phi = \int_{S_k} B dS_k, \tag{7}$$

где B — поток вектора магнитной индукции, Тл;

S_k — площадь контура, мм².

Из приведенных формул следует вывод, что на импеданс ветви влияет площадь под

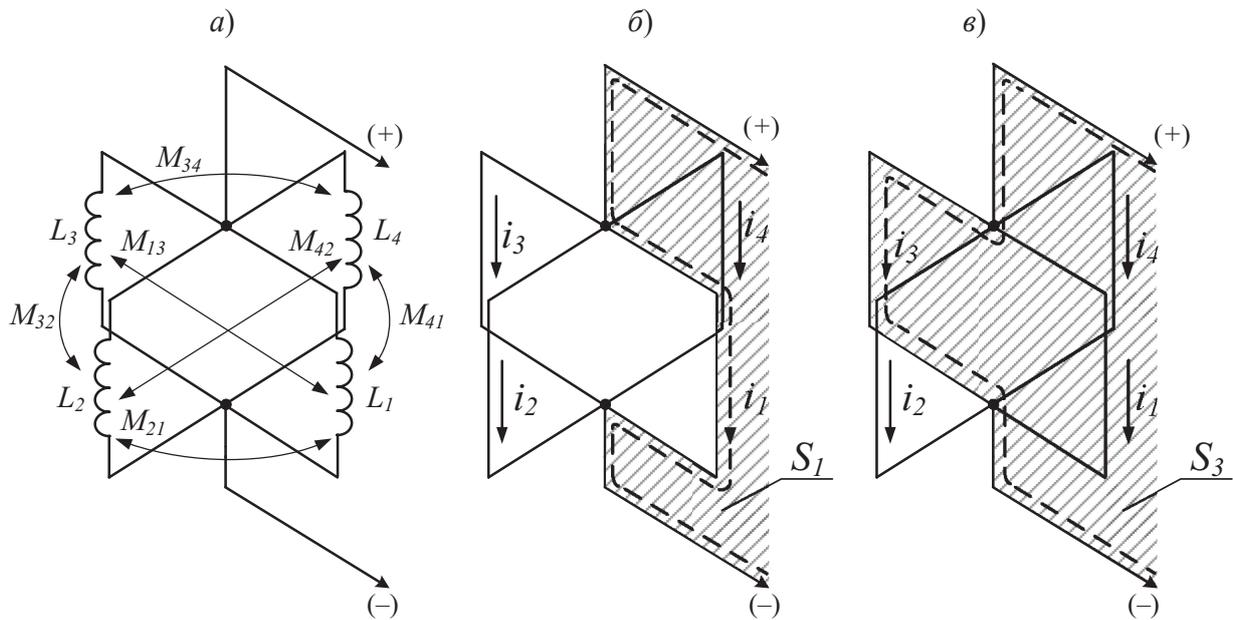


Рис. 7. Индуктивность и взаимная индуктивность параллельных ветвей плеча — а; площадь S_1 контура протекания тока i_1 — б; площадь S_3 контура протекания тока i_3 — в

контуром протекания тока. Так, например, площадь S_1 под контуром протекания тока i_1 (рис. 7б) отличается по величине от площади S_3 под контуром протекания тока i_3 (рис. 7в), что в последующем приводит к неравенству индуктивностей в этих контурах, что и является причиной разброса величины токов по ветвям.

Известно, что взаимная индуктивность двух контуров может быть как положительной, так и отрицательной и изменяет свой знак при изменении направления одного из токов [14]. С учетом этого в модели плеча с равноудаленным подводом тока (рис. 6а) одну из токоведущих шин расположим равноудаленно от параллельных ветвей, но максимально близко ко второй токопроводящей шине. Такое решение обеспечит равенство всех площадей контуров протекания тока, например $S_1 = S_3$, и снизит зависимость величины индуктивности от положения токоведущих шин. Так как ток i в них направлен противоположно, то и магнитная индукция B от них обращена встречно. Упро-

щенный вид модели плеча и диаграммы распределения токов по ветвям представлены на рис. 8а и 8б соответственно.

По результатам моделирования на рис. 8б показано практически равномерное распределение токов по всем параллельным ветвям, что свидетельствует об их идентичном импедансе.

Построение модели плеча ВИП с равноудаленным подводом тока (рис. 6–8) выполнено для исследования факторов, влияющих на распределение токов. При этом в качестве конструкции, применимой к ВИП электровоза, такое расположение ветвей не рассматривается по причине ограниченных габаритов преобразователя внутри электровоза, в особенности при воздушном охлаждении, реализуемом на всех отечественных электровозах переменного тока.

На основании полученных результатов исследований распределения токов по параллельным ветвям автором предложен способ подвода тока, обеспечивающий равномерное

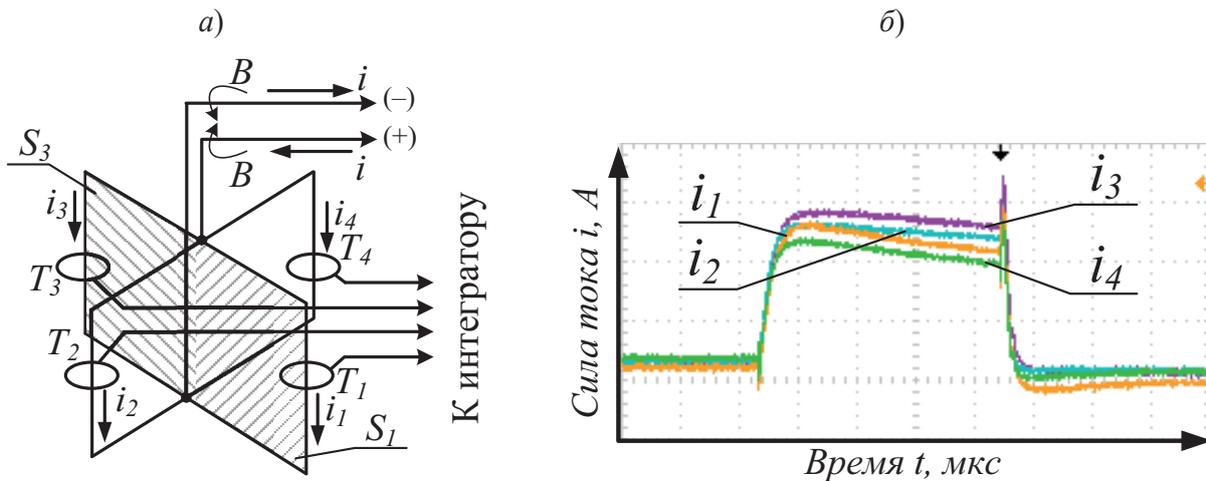


Рис. 8. Моделирование равноудаленного подвода тока с измененным расположением токоведущих шин: а — модель плеча; б — диаграммы протекания токов

распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств, а также удовлетворяющий условиям ограниченных габаритов внутри электровоза с воздушным охлаждением оборудования. На рис. 9 представлена предлагаемая модель плеча, а также диаграммы протекания токов по параллельным ветвям, полученные по результатам физического моделирования. Обозначения элементов на рис. 9 соответствуют приборам схемы на рис. 4.

По результатам моделирования получено удовлетворительное распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов. Выравнивание токов обеспечивается за счет предлагаемого способа подвода тока, в котором выполнены встречное включение силовых шин и их смещение относительно точек подвода тока к ветвям. Так, например, выполнено смещение шины, обозначенной позицией 1, относительно первой и второй ветвей плеча, что увеличивает для данных ветвей активное сопротивление, одновременно снижая их индуктивность за счет встречного включения

шин 1, 2 и шин 5, 6. Снижение индуктивности обеспечивается за счет того, что векторы магнитной индукции $B_{\Sigma i}$ и $B_{i_1+i_2}$ направлены встречно, что обусловлено встречным направлением тока i и суммы токов $i_1 + i_2$, протекающих в этих шинах. При этом импеданс первой и второй ветвей выравнивается относительно импедансов третьей и четвертой, в цепи которых активное сопротивление уменьшено за счет приближенного подвода тока шинами 1 и 6. Так как к параллельным ветвям приложено одинаковое напряжение и они обладают идентичным друг другу импедансом, то в них протекает равный ток, что подтверждается результатами испытаний: на диаграмме протекания токов (рис. 9) кривые i_1-i_4 накладываются друг на друга, разброс токов составляет менее 5%.

С учетом того, что по условиям моделирования расположение ветвей на физической модели плеча соответствует геометрическим размерам плеча ВИП электровоза, предложенный способ подвода тока возможно применить в конструкции плеч ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов переменного тока. Исследование работы предложенного способа подвода тока

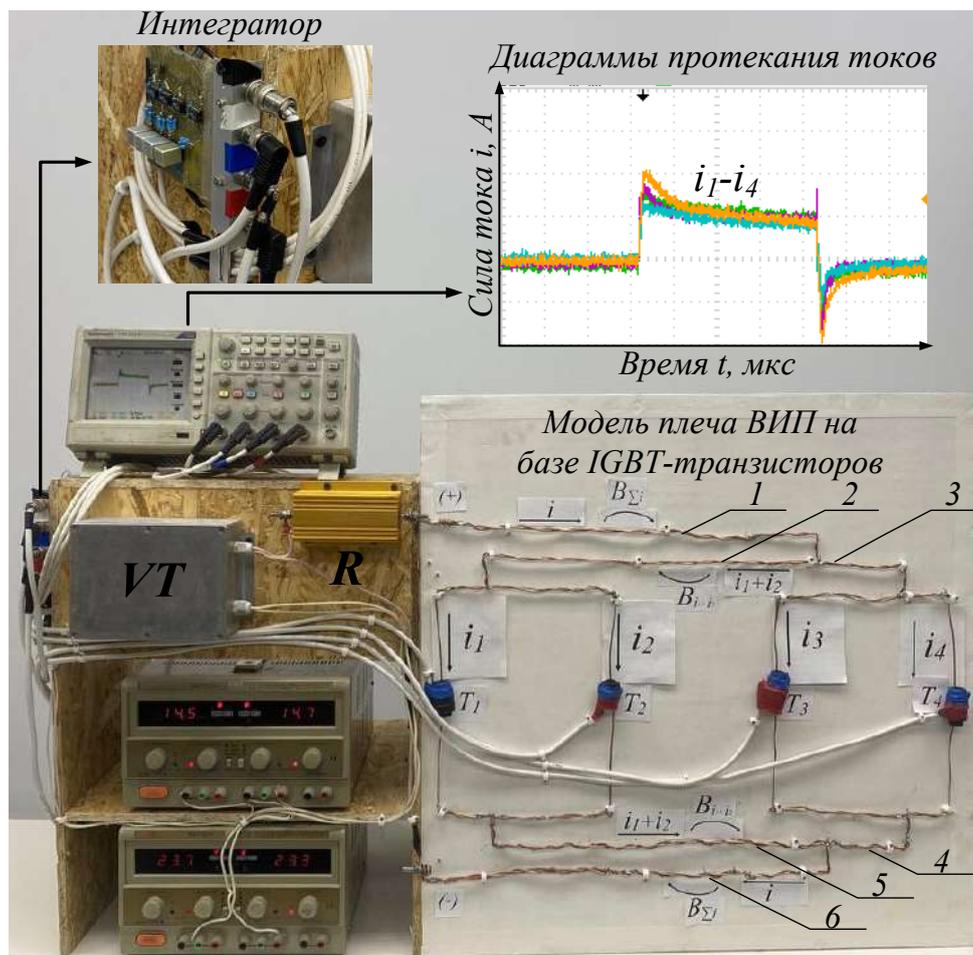


Рис. 9. Моделирование предлагаемого способа подвода тока к плечу ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов (фотография предоставлена автором)

в условиях электровоза представляет интерес для дальнейшей научной проработки.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Типовые способы подвода тока, такие как односторонний и диагональный, не обеспечивают удовлетворительной симметрии токов без выравняющих устройств. Разброс токов в них по результатам испытаний может достигать 96% и 55% соответственно, что делает их неприменимыми в конструкции плеч ВИП на базе IGBT-транзисторов.

2. Разброс токов по параллельным ветвям при равноудаленном способе подвода тока достигает 39%, но может быть уменьшен за счет выравнивания индуктивностей и взаимоиндуктивностей контуров протекания токов путем изменения положения токоведущих шин.

3. Разработан способ подвода тока, обеспечивающий распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов без применения выравняющих устройств. По результатам испытаний предложенного способа разброс токов по ветвям четырехтранзисторного плеча ВИП составил не более 5%.

4. В результате для электровозов серии «Ермак» имеется возможность построить ВИП на базе IGBT-транзисторов, которые позволят увеличить пропускную и провозную способность тяговых участков Восточного полигона.

Библиографический список

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации: указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899.
2. Знаенко В.Н., Линьков А.О. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока в тяжеловесном движении // Молодая наука Сибири. 2021. № 2(12). С 1–7.
3. Самойлова А.С., Мельниченко О.В. Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1(77). С. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.
4. Макашева С.И., Пинчуков П.С., Мельниченко О.В. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристорных и IGBT-транзисторов // Известия Транссиба. 2022. № 3(51). С. 112–125.
5. Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения / П.В. Григоренко [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 1. С. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264
6. Дубровский З.М., Лорман Л.М. Электровозы ВЛ60к и ВЛ60п/к: руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1993. 400 с.
7. Магистральные электровозы переменного тока ВЛ60 и ВЛ80 / Б.А. Тушканов [и др.]. М.: Транспорт, 1964. 556 с.
8. Капустин Л.Д., Копанев А.С., Лозановский А.Л. Особенности устройства и эксплуатации электровоза ВЛ80р. М.: Транспорт, 1979. 175 с.
9. Бурдасов Б.К., Толстых В.А., Янбиков В.Я. Тиристорный преобразователь для электровозов ВЛ85 // Вестник ВНИИЖТ. 1988. № 1. С. 20–23.
10. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов [и др.]. М.: Транспорт, 1992. 480 с.
11. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. М.: ТрансЖелДорИздат, 1958. 264 с.
12. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Э.М. Аптер [и др.]. М.: Энергия, 1975. 208 с.
13. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. Новочеркасск: ВЭлНИИ, 2005. 125 с.
14. Режимы работы магистральных электровозов / О.А. Некрасов [и др.]. М.: Транспорт, 1983. 231 с.
15. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. 2-е изд. М.: СОЛОН-Пресс, 2015. 416 с.
16. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 487 с.

Дата поступления: 24.07.2024

Решение о публикации: 29.08.2024

Контактная информация:

ЗНАЕНОК Вячеслав Николаевич — аспирант;
znaenock@yandex.ru

Development of a method for supplying current to the arms of a rectifier-inverter converter based on IGBT for electric locomotives of the “Ermak” series

V. N. Znaenok

Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia

For citation: *Znaenok V.N.* Development of a method for supplying current to the arms of a rectifier-inverter converter based on IGBT for electric locomotives of the “Ermak” series // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 801–813. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-801-813

Abstract

Purpose: to develop a method of current supply that ensures its uniform distribution over parallel branches of the arm of a rectifier-inverter converter based on IGBT without using equalizing devices for AC electric locomotives with a collector traction drive. **Methods:** a physical model of a four-transistor rectifier-inverter converter arm connected through a controlled power key to a power source was built, on which an analysis of the current distribution was carried out for various methods of its supply to parallel branches. **Results:** diagrams of current distribution along parallel branches of the arm with different methods of current supply were obtained and analyzed, the influence of the topology of the arm power buses on the circuit parameters was studied. A method of current supply to the arm of the rectifier-inverter converter was developed, providing a spread of currents along the branches of no more than 5%. **Practical significance:** the results can be used in the construction of rectifier-inverter converter based on IGBT for the “Ermak” series electric locomotives, which will increase the throughput and carrying capacity of the traction sections of the Eastern Polygon.

Keywords: AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, IGBT, parallel connection, operability, current equalization

References

1. Ob utverzhdenii prioritetnyh napravlenij razvitiya nauki, tekhnologij i tekhniki v Rossijskoj Federacii i perechnya kriticheskikh tekhnologij Rossijskoj Federacii: ukaz Prezidenta RF ot 07.07.2011 No. 899. (In Russian)
2. Znaenok V.N., Lin'kov A.O. Povyshenie energeticheskikh pokazatelej elektrovozov peremennogo toka v tyazhelovesnom dvizhenii // Molodaya nauka Sibiri. 2021. No. 2 (12). S 1–7. (In Russian)
3. Samojlova A.S., Mel'nichenko O.V. Povyshenie energoeffektivnosti raboty sovremennogo otechestvennogo elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya // Sovremennye tekhnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie. 2023. No. 1(77). S. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143 (In Russian)
4. Makasheva S. I., Pinchukov P. S., Mel'nichenko O. V. Ocenka poter' napryazheniya v tyagovoj seti pri rabote elektrovozov s vypryamitel'no-invertornymi preobrazovatelyami na baze tiristorov i IGBT-tranzistorov // Izvestiya Transsiba. 2022. No. 3(51). S. 112–125. (In Russian)
5. Razrabotka sposoba raznesennogo upravleniya tranzistornymi tyagovymi preobrazovatelyami elektrovoza na pervoj zone regulirovaniya vypryamlenno napryazheniya / P.V. Grigorenko [i dr.] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, vyp. 1. S. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264 (In Russian)

6. Dubrovskij Z.M., Lorman L.M. Elektrovozy VL60k i VL60p/k: rukovodstvo po ekspluatacii. M.: Transport, 1993. 400 s. (In Russian)
7. Magistral'nye elektrovozy peremennogo toka VL60 i VL80 / B.A. Tushkanov [i dr.]. M.: Transport, 1964. 556 s. (In Russian)
8. Kapustin L.D., Kopanev A.S., Lozanovskij A.L. Osobennosti ustrojstva i ekspluatacii elektrovoza VL80r. M.: Transport, 1979. 175 s. (In Russian)
9. Burdasov B. K., Tolstyh V. A., YAnbikov V. Ya. Tiristornyj preobrazovatel' dlya elektrovozov VL85 // Vestnik VNIIZHT. 1988. No. 1. S. 20–23. (In Russian)
10. Elektrovoz VL85: rukovodstvo po ekspluatacii / B. A. Tushkanov [i dr.] M.: Transport, 1992. 480 s. (In Russian)
11. Tihmenev B.N. Elektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami. M.: TransZHelDorIzdat, 1958. 264 s. (In Russian)
12. Moshchnye upravlyaemye vypryamiteli dlya elektroprivodov postoyannogo toka / E.M. Apter [i dr.]. M.: Energiya, 1975. 208 s. (In Russian)
13. Elektrovoz magistral'nyj 2ES5K (3ES5K): rukovodstvo po ekspluatacii. Kniga 5. Opisanie i rabota. Elektronnoe oborudovanie. Preobrazovateli. IDMB.661142.009.RE5. Novocherkassk: VEINII, 2005. 125 s. (In Russian)
14. Rezhimy raboty magistral'nyh elektrovozov / O. A. Nekrasov [i dr.]. M.: Transport, 1983. 231 s. (In Russian)
15. Semenov B. Yu. Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu. 2-e izd. M.: SOLON-Press, 2015. 416 s. (In Russian)
16. Kalantarov P.L., Cejtlin L.A. Raschet induktivnostej. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 487 s. (In Russian)

Received: 24.07.2024

Accepted: 29.08.2024

Author's information:

Vyacheslav N. ZNAENOK Postgraduate Student;
znaenock@yandex.ru

УДК 621.331.3.025.1

Обеспечение электроэнергетической доступности в районе Насирии и Басры (Южный Ирак) за счет системы нетягового электроснабжения скоростной железнодорожной магистрали

М. Д. Д. Алсултан^{1,2}, М. В. Шевлюгин¹

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), Россия, 127055, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

² Кербельский университет, Ирак, Кербела

Для цитирования: Алсултан М. Д. Д., Шевлюгин М. В. Обеспечение электроэнергетической доступности в районе Насирии и Басры (Южный Ирак) за счет системы нетягового электроснабжения скоростной железнодорожной магистрали // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 814–824. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-814-824

Аннотация

Цель: система нетягового электроснабжения — это оптимальное решение для обеспечения электроэнергией железнодорожного транспорта. Система передает электричество потребителям через провода, установленные над путями. Этот способ имеет ряд преимуществ, которые могут оказаться особенно полезными в условиях Южного Ирака. В статье рассматриваются различные стратегии по обеспечению доступности электроэнергии в районах Насирии и Басры, расположенных на юге Ирака, посредством применения нетяговой системы электроснабжения, специально разработанной для высокоскоростных железных дорог. Помимо обсуждения технических характеристик системы, статья подчеркивает ее значимость для удовлетворения энергетических потребностей региона. Анализ технических деталей и оценка возможных последствий вносят вклад в дискуссию о внедрении нетяговой системы электроснабжения и освещают ее потенциал для решения проблемы энергетической доступности в Насирии и Басре. **Методы:** для успешной реализации проекта по электроснабжению исследователи применили систему моделирования, созданную с использованием программы ETAP. Этот мощный инструмент дает возможность определять значения потребляемой электропоездами электрической нагрузки, нетяговых нагрузок и моделировать работу всей электрической инфраструктуры с высокой точностью. **Результаты:** исследование предоставляет ценную информацию о сложных и стандартизированных системах переменного тока, а также о сетевых системах расчета нагрузок на тяговые и нетяговые распределительные провода. Полученные данные свидетельствуют о том, что предлагаемая нетяговая система может повысить энергоэффективность и снизить зависимость от традиционных источников энергии, способствуя устойчивому развитию региона. **Практическая значимость:** исследования позволяют оптимизировать работу системы, обеспечивая высокоэффективную обработку электроэнергии.

Ключевые слова: нетяговые потребителям, два провода — рельс (ДПР), система тягового электроснабжения, моделирование нетягового электроснабжения, тяговые подстанции переменного тока

Введение

Южный Ирак, включая регионы Насирии и Басры, стал центром внимания в вопросах развития инфраструктуры и обеспечения

ключевых объектов, таких как транспортные сети и электроэнергетические системы. Одной из главных задач в этом регионе является

предоставление надежного и стабильного электроснабжения для различных секторов, включая промышленность, транспорт, а также городские и частные дома. В связи с этим возрастает интерес к внедрению новых технологий энергоснабжения, объединяющих нетяговых потребителей, энергосбытовые сети и систему тягового электроснабжения для высокоскоростных железнодорожных магистралей в единую комплексную систему энергообмена [1].

Постановка задачи

После военных действий в электроэнергетической системе Ирака имеется ряд фундаментальных проблем:

1. Недостаточно генерирующих мощностей.
2. Недостаточная развитость топологии электроэнергетических сетей.
3. Повышенные потери в линиях электропередачи за счет их большой протяженности при низком уровне напряжения.
4. Недостаточный уровень надежности всех устройств электроснабжения.
5. Устаревшее и изношенное оборудование старых электростанций, линий электропередачи повышенного напряжения, трансформаторных подстанций и конечных распределительных сетей.
6. Отсутствие централизованного управления.
7. Отсутствие резервных линий электропередачи, наличие объединенной системы электроснабжения и многого другого.

Учитывая все вышесказанное, проектируемая система нетягового электроснабжения предоставляет возможность обеспечивать нетяговых потребителей энергией значительной мощности. Это преимущество особенно актуально в условиях энергодефицита, характерного для Южного Ирака [2].

Внедрение системы нетягового электропитания способствует значительному снижению потерь, которые обычно возникают в процессе передачи электроэнергии. Этот прогресс в первую очередь связан с использованием проводов большого сечения, стратегически проложенных непосредственно над железнодорожными путями, что позволяет эффективно сократить расстояние, по которому должно проходить электричество. Такой упрощенный путь не только сводит к минимуму потери энергии, но и заметно повышает общую энергоэффективность. Кроме того, эта система способствует повышению уровня эксплуатационной стабильности, поскольку воздушные провода по своей природе менее подвержены повреждениям в результате неблагоприятных погодных условий или различных внешних факторов, что, в свою очередь, снижает вероятность простоев или аварий, связанных с перебоями в подаче электроэнергии. Энергия, вырабатываемая и подаваемая через эту систему, поставляется под особенно высоким напряжением, в частности на уровнях 27,5 и 28,5 кВ, что необходимо для поддержания производительности и надежности электроснабжения для современных транспортных систем [3].

Внедрение системы нетягового электроснабжения на скоростных железнодорожных магистралях в регионах Насирии и Басры может существенно повысить эффективность. Это улучшит надежность и доступность перевозки энергоносителей по железной дороге, что будет способствовать развитию экономики и повышению уровня жизни местного населения.

Кроме того, внедрение этой технологии может стать важным шагом в направлении снижения зависимости региона от традиционных источников энергии, таких как нефть и газ, и способствовать переходу

к более экологически чистым и устойчивым источникам энергии, а также снизить зависимость от импорта [4].

На рис. 1 изображена карта Южного Ирака, на которой показана электрифицированная железнодорожная линия и основная система электроснабжения, протянувшаяся от Багдада в центре Адака до Басры на крайнем юге. Здесь нанесена также система тягового электроснабжения высокоскоростной железной дороги в Насирии и регионе Басры с системой «два провода — рельс» (ДПР).

Следует особо отметить, что благодаря системе тягового электроснабжения (СТЭ) удастся значительно улучшить электроэнергетическую обстановку в значительной части Южного Ирака за счет возможности питания

тяговых потребителей от третьих обмоток тяговых трансформаторов и распределенной системы электроснабжения ДПР. Нетяговая линия электроснабжения, работающая по трехфазной системе с напряжением 27,5 кВ, используется для электроснабжения железных дорог и близлежащих районных потребителей, расположенных вдоль железных дорог, электрифицированных однофазным переменным током [6].

В табл. 1 представлены потребители продольного электроснабжения ДПР, что наглядно иллюстрирует комплексную систему двухпроводных железнодорожных линий (ДПР), специально внедренную в районах Насирии и Басры. Она включает в себя в общей сложности 10 отдельных единиц выходной

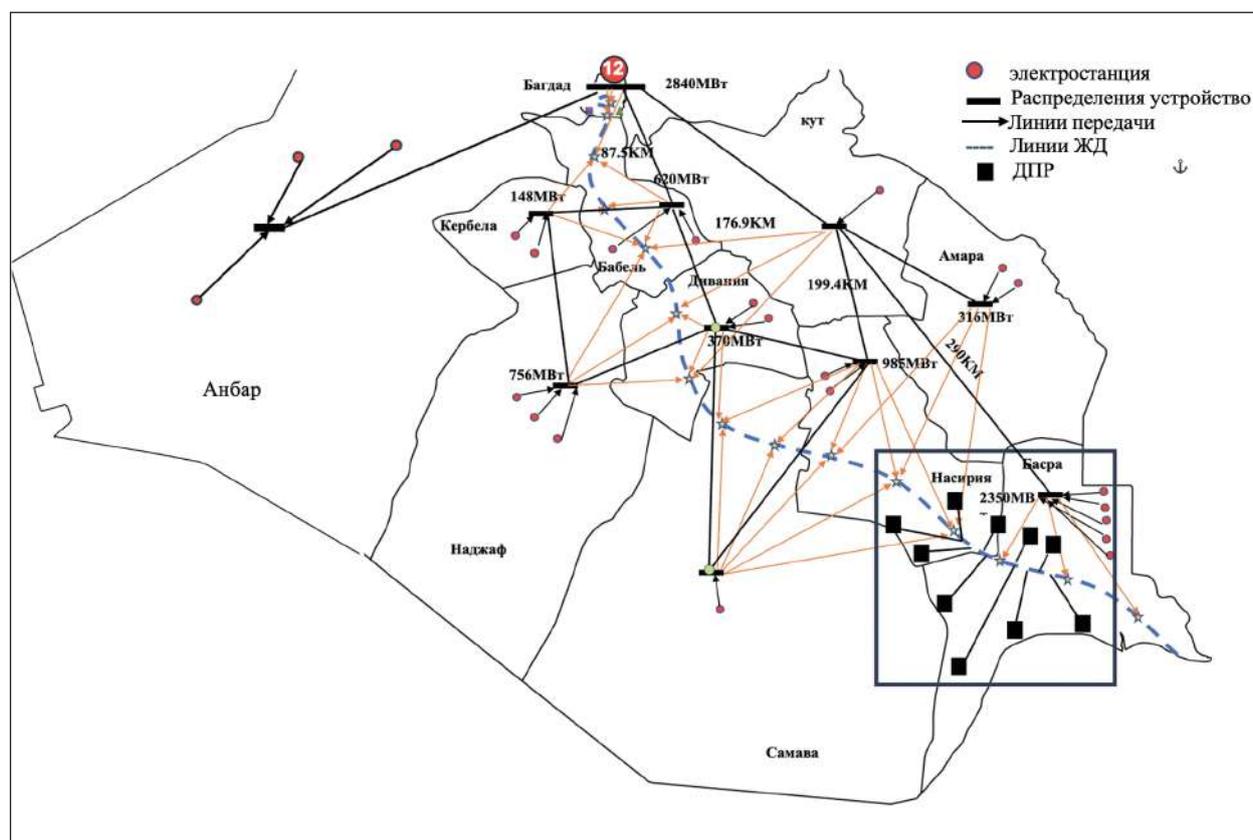


Рис. 1. Схема электроэнергетической системы и СТЭ железной дороги Южного Ирака с участком ДПР [5]

ТАБЛИЦА 1. Потребители системы ДПР

№.	Название	Тип потребителя	Мощность (кВт)
1	Шерстяная одежда	Фабрика	600
2	Деревня Хамза	Населенный пункт	450
3	Деревня Аль-Гараыв	Населенный пункт	500
4	Цементный завод	Завод	1200
5	Шаайба	Нефтеперерабатывающий завод	1500
6	Маджнун	Нефтеперерабатывающий завод	2000
7	Аль-Румела	Нефтеперерабатывающий завод	1600
8	Нахар Амар	Нефтеперерабатывающий завод	1300
9	Аль-Бугариб	Нефтеперерабатывающий завод	1400
10	Стеклопластиковая труба	Завод	700

мощности, необходимых для удовлетворения разнообразных потребностей и требований потребителей.

В число потребителей электроэнергии, поставляемой по линиям ДПР, входит широкий спектр объектов, таких как ремонтные пункты, грузовые дворы, склады, сети освещения и др. Две фазы линии состоят из сталеалюминиевых проводов, подвешенных со стороны поля на опорах контактной сети. Третий фазный провод представляет собой не что иное, как сами рельсы, отсюда и название. Опоры снабжены проводами от фазы, подающей питание в контактную сеть, а также от фазы, которая на данном участке не используется для тяговых целей [7].

Для обслуживания потребителей большой мощности напряжение в линии ДПР может быть увеличено до 29 кВ. С другой стороны, для потребителей, не являющихся тяговыми системами, подаваемое на них напряжение снижается с помощью комплектных трансформаторных подстанций (КТП), стратегически установленных там, где это необходимо. Эти трансформаторные подстанции могут быть оснащены однофазными или трехфазными

трансформаторами. Стоит отметить, что линия ДПР может питаться от одной тяговой подстанции (ТП) или от двух соседних подстанций при условии, что эти подстанции относятся к одному типу с точки зрения подключения к внешней сети электроснабжения [8].

На случай возникновения неисправностей или сбоев в системе тягового электроснабжения существует план действий в чрезвычайных ситуациях, предполагающий автоматическое переключение электропитания на линию ДПР с соседней действующей ТП. Это обеспечивает бесперебойное и надежное энергоснабжение железных дорог и различных зависимых от них потребителей [9].

Моделирование работы СТЭ железнодорожной магистрали с учетом системы ДПР

Модель СТЭ с линией ДПР протяженностью 129,35 км в области Насирии и Басры (Южный Ирак) была построена и отлажена с помощью программного комплекса ETAP [10]. В модели предусмотрены все элементы энергетической системы: электростанции, линия электропередачи (ЛЭП), распределительные

устройства, тяговые подстанции, контактная сеть, кабельные питающие линии, линии обратного тягового тока и т. д. В модели также учтены профиль пути, исполненный график движения поездов и характеристики локомотивов [11].

На рис. 2 показано формирование профиля участка железнодорожного маршрута с использованием данных, полученных от космических спутников. Этот метод помог устранить недостаток данных о профиле маршрута. Полученная информация иллюстрирует изменения высоты вдоль маршрута, выделяя значимые подъемы и спуски, которые может пройти поезд, а также области, которые будут обеспечены энергией через систему ДПР. Принятый подход позволяет более точно определить электрическую нагрузку, потребляемую электропоездами, нетяговые нагрузки и прове-

сти моделирование работы всей электрической инфраструктуры [12].

На рис. 3 представлена мнемосхема электропитания выделенного участка системы тягового электроснабжения района Насирии и Басры с учетом системы ДПР. Здесь предусмотрено питание нетяговых потребителей, согласно табл. 1.

Результатами имитационного моделирования являются осциллограммы токов и напряжений в линиях ТП, ДПР в системе первичного электроснабжения. На рис. 4 и 5 представлены зависимости напряжения и тока ТП в районе Басры, на рис. 6 и 7 показаны зависимости напряжения и тока в линии ДПР в том же районе [13].

По результатам имитационного моделирования для обеспечения перевозочного процесса на железнодорожной линии ТП должны



Рис. 2. Формирование продольного профиля трассы железнодорожной магистрали при использовании данных, полученных из сканирования космических спутников.

Источник: <https://votetovid.ru/#33.674,43.489,7z,33.063924,44.912109i,tb>

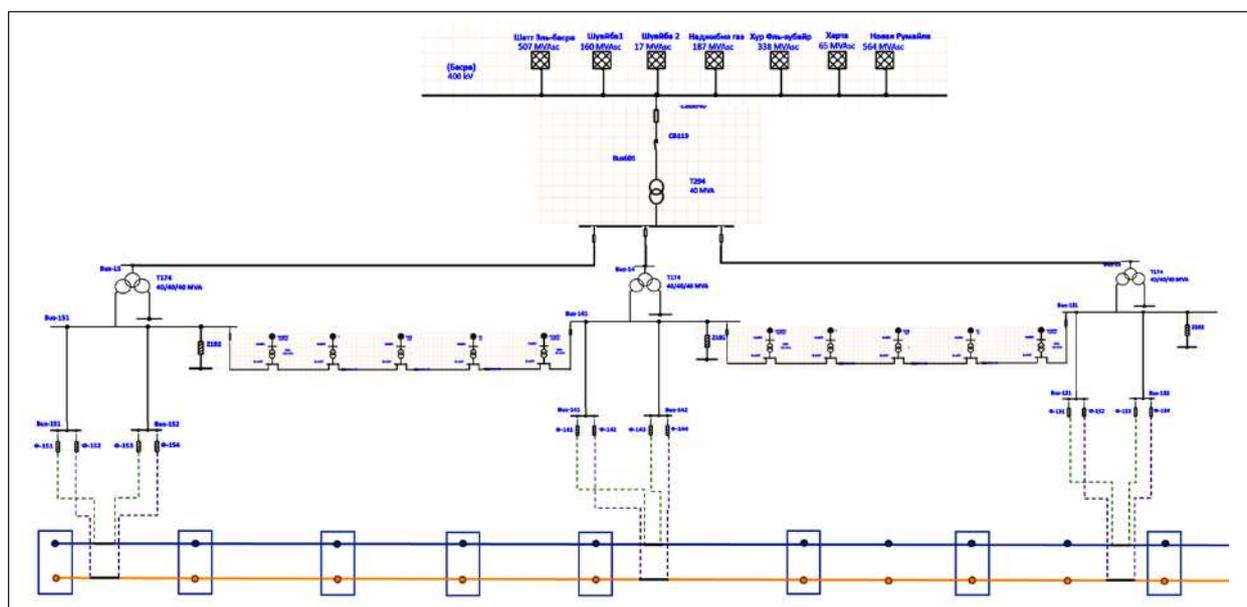


Рис. 3. Мнемосхема электроснабжения выделенного участка по системе ДПР

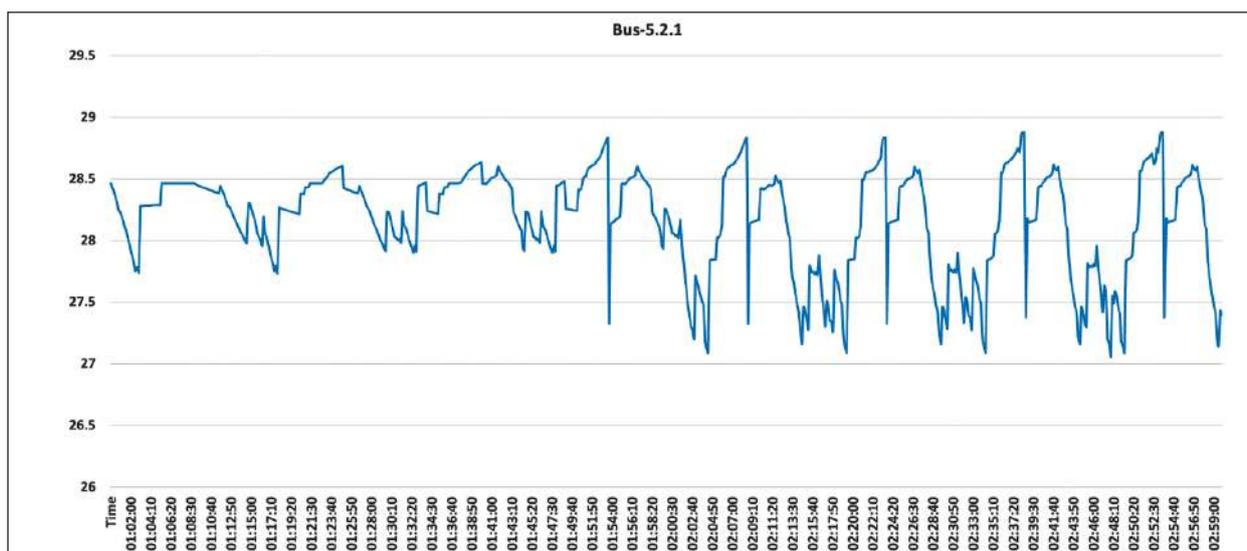


Рис. 4. Напряжение на шинах ТП железнодорожной линии

быть оснащены тяговыми трансформаторами мощностью 16 МВА (один трансформатор в резерве).

Однако для обеспечения электроснабжения нетяговых потребителей по системе ДПР и с помощью третьей обмотки тягового трансформатора следует к тяговой мощности прибавить еще 1,7 и 4,2 МВА соответственно. Учи-

тывая весь комплекс разнородной нагрузки, на каждой ТП необходимо установить трансформатор 25 МВА (и еще один в резерв). Модернизация электроэнергетической системы (ЭЭС) в виде запуска новых электростанций (ЭС) и объединения питающих пунктов позволила обеспечить необходимые объемы энергопотребления [14].

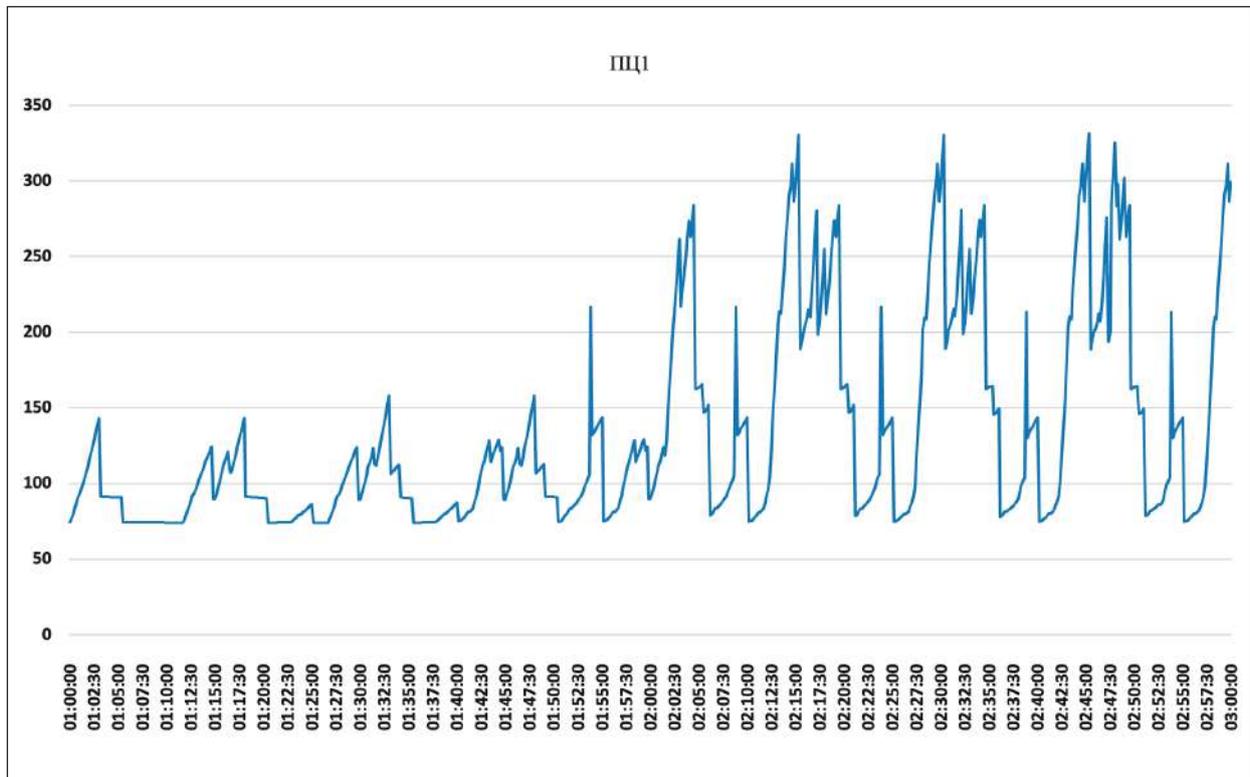


Рис. 5. Ток ТП железнодорожной линии

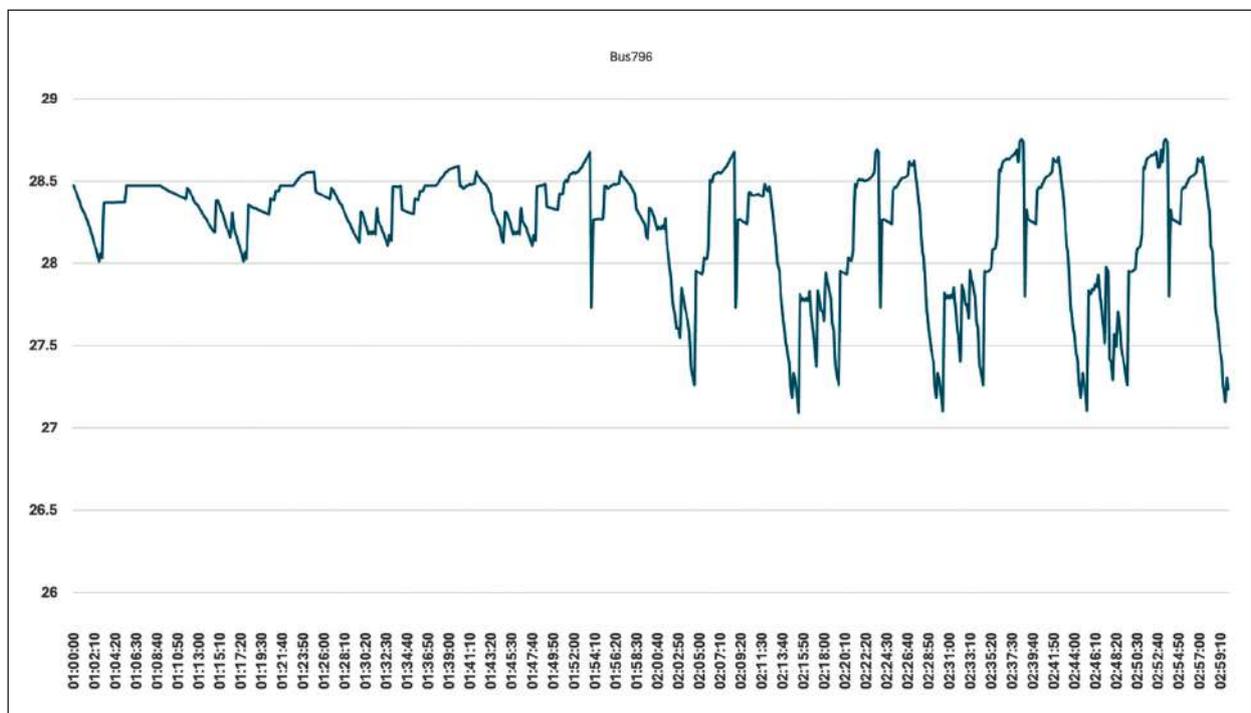


Рис. 6. Напряжение в линии ДПР

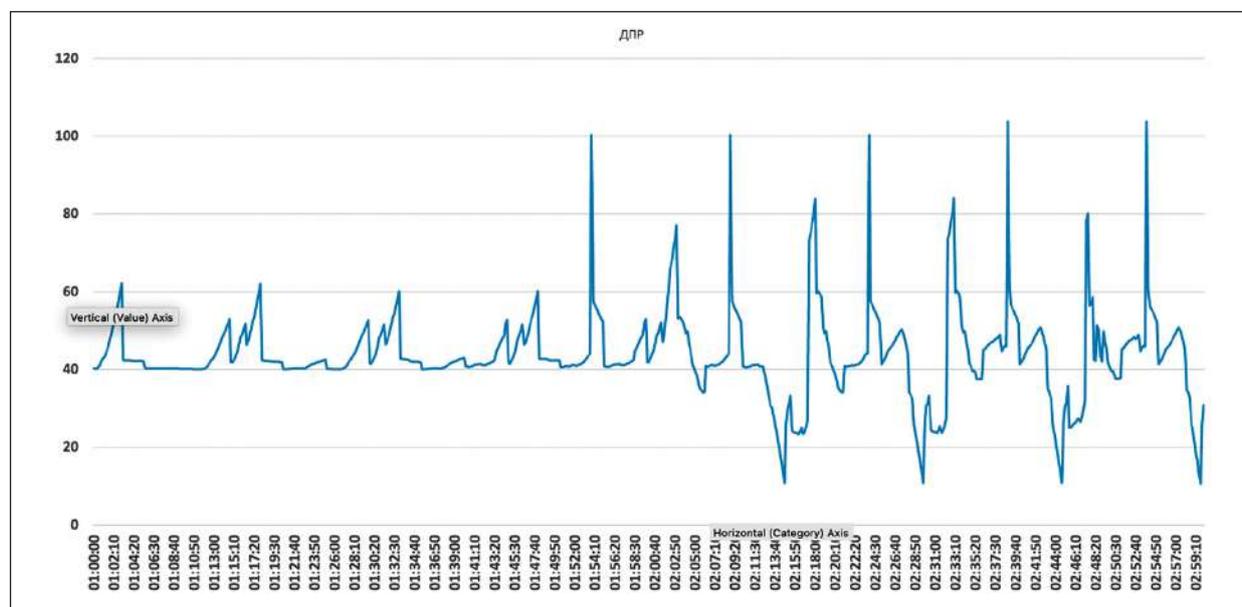


Рис. 7. Ток в линии ДПР

Вывод

В этой научной статье большое внимание уделяется первостепенной важности использования нетяговой системы электроснабжения для обеспечения электричеством потребителей в районах Насирии и Басры, расположенных в южной части Ирака. Внедрение такой системы обладает огромным потенциалом для значительного улучшения энергетической инфраструктуры этого региона и, следовательно, обеспечения надежного и стабильного электроснабжения множества разнообразных потребителей.

Для успешной реализации проекта по электроснабжению исследователи применили комплексную систему сбора и обработки необработанных данных в условиях дефицита информации, созданную с использованием программного комплекса ЕТАР. Использование предложенного подхода позволило определить значения электрической нагрузки потребителей, с высокой точностью смоделировать работу всей электрической инфраструктуры и выбрать оборудование тяговых подстанций и устройств нетяговой сети электроснабжения [15].

Кроме того, использование данной системы энергоснабжения способствует повышению энергоэффективности и, следовательно, неизбежному снижению зависимости от традиционных источников энергии. Несомненно, эта ключевая мера знаменует собой важный шаг на пути к обеспечению устойчивого развития и в итоге повышению качества жизни в этих конкретных иракских регионах.

Библиографический список

1. Manihal M. A. Estimation and Analysis of Demand Structure for the Rail Transport Sector in Iraq for the Period (1999–2016) // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2019. Vol. 10, iss. 02. P. 424–445. URL: <https://www.iaeme.com/ijciyet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=02> (accessed: 21.08.2023).
2. Mousavi S. M. G., Tabakhpour Adel L., Fuchs Ewald F. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014. Vol. 62, iss. 5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7000530> (accessed: 21.08.2023).

3. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Качество электроэнергии в линиях электропередачи «два провода — рельс рельс» // *Электрификация транспорта*. 2014. № 7. С. 84–91.
4. Емцев А.Н., Шумаков Н.М., Фадеев В.А. Линии ДПП электрифицированных железных дорог как источник питания нетяговых потребителей // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки — развитию регионов Сибири*. 2010. Т. 2. С. 3–8.
5. Шевлюгин М. В., Алсултан М. Д. Д. Современные принципы проектирования электрификации Южноиракских железных дорог // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2024. № 6. С. 7–15.
6. Iraq Republic Railways 2022 (IRR). URL: <http://iraq-jccme.jp/files/railway-projects-Iraq-rr25032022.pdf> (accessed: 21.08.2023)
7. Бочев А.С., Финоченко Т.Э. Модернизация линии продольного электроснабжения «два провода — рельсы» // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2006. № 4. С. 117–119.
8. Устройство для электроснабжения нетяговых потребителей электрифицированных железных дорог: пат. 46979 U1, Рос. Федерация / Ожиганов Н.В., Бочев А.С.; заявл. 04.04.2005; опубли. 08.10.2005. Бюл. № 22. 11 с.
9. Семенова Е.Ю. Причина недостоверности учета потребления электроэнергии на линиях «два провода — рельс» продольного электроснабжения электрифицированного транспорта // *Электричество*. 2021. № 9. С. 67–72.
10. Application of ETAP™ ETRAX™ software package for digital simulation of distribution network that feeds an AC traction power supply system / V. Tulsy [at al.] // In collection: E3S Web of Conferences. Ser. ENERGY-21 — Sustainable Development and Smart Management. 2020. P. 07011.
11. Шевлюгин М. В., Щегловитова Е. В. Имитационная модель системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока для оценки качества электроэнергии на вводах подстанций // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2023. № 1. С. 89–92.
12. Модель совмещенной тяговой подстанции метрополитена с учетом тяговой нагрузки и потребителей собственных нужд / Л.М. Клячко [и др.] // *Электротехника*. 2021. № 9. С. 22–25.
13. Цифровая модель тяговой подстанции двух родов тока / М.В. Шевлюгин [и др.] // *Электротехника*. 2018. № 9. С. 40–44.
14. Шевлюгин М.В., Ермоленко Д.В., Королев А.А. Анализ взаимных электромагнитных влияний между системой тягового электроснабжения и энергосистемой на единой цифровой модели в программном комплексе ETAP // *Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2019. С. 73–81.
15. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. М., 2013.

Дата поступления: 29.07.2024

Решение о публикации: 16.08.2024

Контактная информация:

АЛСУЛТАН Мохаммед Джафар Джасим — аспирант; 1144648@edu.rut-miit.ru

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — докт. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики транспорта; mx_sh@mail.ru

Provision of electric power accessibility in the Nasiriyah and Basra region (Southern Iraq) due to the traction power supply system of the high-speed railway

M. J. J. Alsultan^{1,2}, M. V. Shevlyugin¹

¹ Russian University of Transport (MIIT), 9, Obraztsova st., Moscow, 127055, Russia

² University of Karbala, Iraq, Karbala

For citation: *Alsultan M. J. J., Shevlyugin M. V.* Provision of electric power accessibility in the Nasiriyah and Basra region (Southern Iraq) due to the traction power supply system of the high-speed railway // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 814–824. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-814-824

Abstract:

Purpose: the non-traction power supply system represents an innovative approach to providing electricity for rail transport. It is based on the use of wires installed above the rails to transfer electricity to trains. This method has a number of advantages that can be especially valuable in the conditions of Southern Iraq. The article describes various strategies aimed at ensuring the availability of electricity in the Nasiriyah and Basra regions located in the southern part of Iraq by using a non-traction power supply system designed specifically for high-speed rail. In addition to describing the technical aspects of the aforementioned system, the document also examines its implications in terms of meeting the energy needs of the region. By analyzing the technical aspects and assessing the consequences, this article contributes to the discussion on the implementation of a non-traction power supply system in the region and sheds light on its potential to solve the urgent problem of electricity availability in the Nasiriyah and Basra regions. **Methods:** for the successful implementation of the power supply project, the researchers applied a modeling system created using the ETAR program. This powerful tool provides the ability to determine the values of the electric load consumed by electric trains and non-traction loads and simulate the operation of the entire electrical infrastructure with high accuracy. The results of the study provide valuable information about complex and standardized AC systems, as well as network load calculation systems for traction and non-traction distribution wires. **Practical importance:** research makes it possible to optimize the operation of the system, providing highly efficient processing of electricity.

Keywords: non-traction consumers, two wire-rail (DPR), traction power supply system, modeling of non-traction power supply, traction substations of alternating current

References

1. Manihal M. A. Estimation and Analysis of Demand Structure for the Rail Transport Sector in Iraq for the Period (1999–2016) // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2019. Vol. 10, iss. 02. P. 424–445. URL: <https://www.iaeme.com/ijciyet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=02> (accessed: 21.08.2023).

2. Mousavi S. M. G., Tabakhpour Adel L., Fuchs Ewald F. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective // IEEE Transactions on

Industrial Electronics. 2014. Vol. 62, iss. 5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7000530> (accessed: 21.08.2023).

3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Kachestvo elektroenergii v liniyah elektroperedachi “dva provoda — rel’s” // Elektrifikaciya transporta. 2014. No. 7. S. 84–91. (In Russian)

4. Emcev A.N., Shumakov N.M., Fadeev V.A. Linii DPR elektrificirovannyh zheleznyh dorog kak istochnik pitaniya netyagovyh potrebitelej // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye

- i inzhenernye nauki-razvitiyu regionov Sibiri. 2010. T. 2. S. 3–8. (In Russian)
5. Shevlyugin M. V., Alsultan M. D. D. Sovremennyye principy proektirovaniya elektrifikatsii Yuzhnoirakskikh zheleznykh dorog // Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. 2024. No. 6. S. 7–15. (In Russian)
6. Iraqi Republic Railways 2022 (IRR). URL: <http://iraq-jccme.jp/files/railway-projects-Iraq-rr25032022.pdf> (accessed: 21.08.2023)
7. Bochev A. S., Finochenko T. E. Modernizatsiya linii prodol'nogo elektrosnabzheniya "dva provoda – rel'sy" // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2006. No. 4. S. 117–119. (In Russian)
8. Ustrojstvo dlya elektrosnabzheniya netyagovykh potrebitelej elektrificirovannykh zheleznykh dorog: pat. 46979 U1, Ros. Federatsiya / Ozhiganov N. V., Bochev A. S.; zayavl. 04.04.2005; opubl. 08.10.2005. Byul. No. 22. 11 s. (In Russian)
9. Semenova E. Yu. Prichina nedostovernosti ucheta potrebleniya elektroenergii na liniyah "dva provoda — rel's" prodol'nogo elektrosnabzheniya elektrificirovannogo transporta // Elektrichestvo. 2021. No. 9. S. 67–72. (In Russian)
10. Application of ETAP™ ETRAX™ software package for digital simulation of distribution network that feeds an AC traction power supply system / V. Tulskey [at al.] // In collection: E3S Web of Conferences. Ser. ENERGY-21 — Sustainable Development and Smart Management. 2020. P. 07011.
11. Shevlyugin M. V., Shcheglovitova E. V. Imitacionnaya model' sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka dlya ochenki kachestva elektroenergii na vvodakh podstancij. Energobezopasnost' i energosberezhenie. 2023. No. 1. S. 89–92. (In Russian)
12. Model' sovmeshchennoj tyagovoj podstancii metropolitena s uchetom tyagovoj nagruzki i potrebitelej sobstvennykh nuzhd / L. M. Klyachko [i dr.] // Elektrotehnika. 2021. No. 9. S. 22–25. (In Russian)
13. Cifrovaya model' tyagovoj podstancii dvuh rodov toka / M. V. Shevlyugin [i dr.] // Elektrotehnika. 2018. No. 9. S. 40–44. (In Russian)
14. Shevlyugin M. V., Ermolenko D. V., Korolev A. A. Analiz vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy mezhdu sistemoy tyagovogo elektrosnabzheniya i energosistemoy na edinoj cifrovoj modeli v programmnom komplekse ETAR // Aktual'nye voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. k 75-letiyu aspirantury Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2019. S. 73–81. (In Russian)
15. Shevlyugin M. V. Energosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenah, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelej energii: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk. M., 2013. (In Russian)

Received: 29.07.2024

Accepted: 16.08.2024

Author's information:

Mohammed J. J. ALSULTAN – Postgraduate Student; 1144648@edu.rut-miit.ru

Maxim V. SHEVLYUGIN – Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department Electric Power Engineering of Transport; mx_sh@mail.ru

УДК 629.4.027.3

Обзор и классификация методов борьбы с подкожуховым льдообразованием в гидравлических гасителях колебаний подвижного состава

С. В. Трескин¹, Е. Ю. Дульский¹, В. А. Кручек², П. Ю. Иванов¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

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

Для цитирования: Трескин С. В., Дульский Е. Ю., Кручек В. А., Иванов П. Ю. Обзор и классификация методов борьбы с подкожуховым льдообразованием в гидравлических гасителях колебаний подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 825–834. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-825-834

Аннотация

Цель: рассмотрение вопроса причин возникновения подкожухового льдообразования в гидравлических гасителях колебаний и его влияния на работоспособность подвижного состава железнодорожного транспорта. Проведен обзор механизма подкожухового льдообразования в гидрогасителях, указаны методы обнаружения этого явления, а также вызываемые им негативные факторы, рассмотрены методы борьбы. **Методы:** анализ механизма подкожухового льдообразования, анализ методов устранения или минимизации влияния подкожухового льдообразования на надежность работы гидравлических гасителей колебаний. **Результаты:** основной причиной образования подкожухового льдообразования является набегающий при движении подвижного состава поток воздуха со снегом, который вызывает накопление ледяной массы в подкожуховой области гидрогасителя. Подкожуховое льдообразование способно привести к механическим повреждениям тележек подвижного состава по причине снижения демпфирующей способности гидрогасителей или блокировки рессорного подвешивания. Также возможны повреждения резиновых уплотнений и манжет гидрогасителей. Рассмотрены способы обнаружения указанного явления. Предложен усовершенствованный шуп для обнаружения подкожухового льдообразования. Проанализированы технические предложения, направленные на устранение описываемого явления. Приведены примеры конструкций гидравлических гасителей колебаний, использующие описанные технические предложения. Приведена классификация способов борьбы с подкожуховым льдообразованием в гидравлических гасителях колебаний. **Практическая значимость:** показана необходимость совершенствования гидравлических гасителей колебаний с целью минимизации или устранения влияния подкожухового льдообразования. Показана методика его диагностирования. Продемонстрирована усовершенствованная конструкция шупа для выявления указанного явления. Продемонстрированы различные методы и способы минимизации влияния или устранения подкожухового льдообразования. Приведена классификация методов борьбы с ним.

Ключевые слова: рессорное подвешивание, подвижной состав, гидравлический гаситель, гидродемпфер, гидрогаситель, подкожуховое льдообразование, защитный кожух

Введение

На сегодняшний день в рессорном подвешивании различных типов локомотивов и пассажирских вагонов используются гидравли-ческие гасители колебаний (гидрогасители, гидродемпферы), принцип которых основан на гашении колебаний за счет вязкого трения при

прохождении жидкости через калиброванные отверстия и клапанные блоки [1, 2].

Многие узлы и детали подвижного состава обладают конструктивными элементами, обеспечивающими их защиту от влияния окружающей среды и различных повреждений [3, 4]. В конструкции различных типов гидрогасителей применяются защитные кожухи, выполненные в виде металлических цилиндров. Они предназначены для обеспечения защиты корпуса гидрогасителя от различных механических воздействий, например, ударов и падения с высоты.

Однако работа гидравлических гасителей колебаний зависит от климатических условий, например от температуры окружающей среды [5, 6]. Температура оказывает влияние на вязкость рабочей жидкости, что может послужить причиной изменения демпфирующей способности гидрогасителя, а также снизить свойства резиновых уплотнений [7]. Но наиболее негативное влияние на работоспособность рассматриваемых устройств оказывает подкожуховое льдообразование.

Механизм возникновения подкожухового льдообразования

Учеными ПГУПС установлено, что основной причиной подкожухового льдообразования в гидравлических гасителях колебаний является набегающий поток воздуха со снегом при движении подвижного состава [8, 9]. В зимний период снег проникает в подкожуховую полость гидрогасителя. Затем происходит постепенное наслоение снега, который, в свою очередь, под давлением проушины в ходе работы гидрогасителя на сжатие и растяжение спрессовывается и превращается в снежно-ледяную массу, препятствующую работе гидрогасителя из-за блокирования хода его штока. Появлению льда способ-

ствуют нагрев и последующее охлаждение гидрогасителя в процессе движения и стоянки подвижного состава. Другой возможной причиной указанного явления может стать разрежение воздуха в подкожуховой области гидрогасителя в процессе работы на растяжение. Происходит всасывание из окружающей среды воздуха, с которым в подкожуховую область попадают снег и влага. На рис. 1 показана схема процесса подкожухового льдообразования.

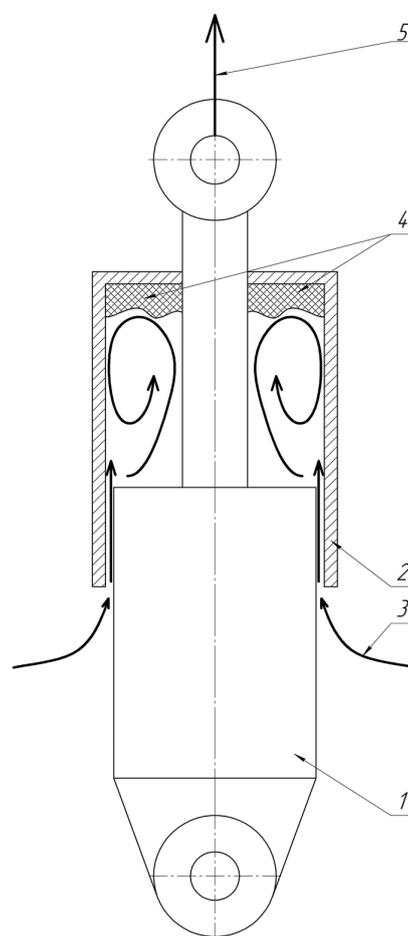


Рис. 1. Схема подкожухового льдообразования:
1 — корпус гидрогасителя; 2 — защитный кожух; 3 — направления потоков воздуха;
4 — подкожуховое льдообразование;
5 — направление движения штока с защитным кожухом

В результате снижается плавность хода подвижного состава, из-за снижения демпфирующей способности гидрогасителей возникают ударные нагрузки, приводящие к механическим повреждениям кронштейнов крепления гидрогасителей и элементов рамы тележки, а также возможно блокирование работы рессорного подвешивания. Образование ледяной массы в подкожуховой области чревато повреждениями резиновых уплотнений и манжет в направляющей втулке гидрогасителя. Повреждения уплотнений и манжет ведут к утечке рабочей жидкости гидравлических гасителей колебаний. На рис. 2 продемонстрирован пример указанных повреждений уплотнений штока гидрогасителя.



Рис. 2. Повреждение уплотнений штока гидрогасителя из-за подкожухового льдообразования (фото авторов)

Диагностика подкожухового льдообразования

Подкожуховое льдообразование требует своевременного обнаружения и устранения. Для этого существуют некоторые способы его диагностирования. При демонтаже гидрогасителя с тележки подкожуховое льдообразование определяется при непосредственной разборке устройства.

Существуют способы обнаружения подкожухового льдообразования без демонтажа гидрогасителя. Так, в работе [10] описывается способ обнаружения под защитным кожухом гидравлического гасителя колебаний спрессованного снега или льда. Суть данного способа заключается в применении специального щупа, оснащенного измерительной шкалой. С помощью данного щупа измеряют длину защитного кожуха гидрогасителя, а затем щуп помещают в пространство между корпусом гидрогасителя и его кожухом и замеряют глубину до верхней проушины. При несоответствии полученных величин делается вывод о наличии подкожухового льдообразования (рис. 3).

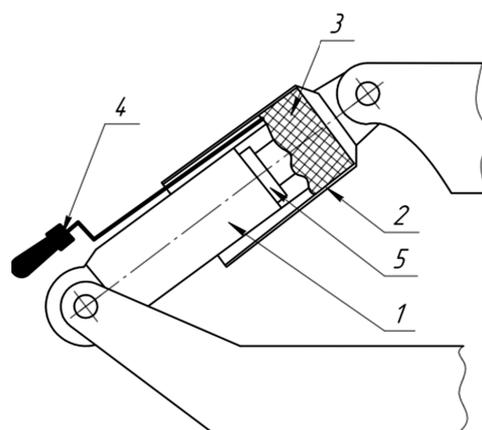


Рис. 3. Выявление подкожухового льдообразования в гидрогасителях с помощью щупа: 1 — корпус гидрогасителя; 2 — защитный кожух; 3 — подкожуховое льдообразование; 4 — щуп; 5 — уплотнение штока. Источник: [10]

Также сделать вывод о наличии подкожухового льдообразования возможно по внешнему признаку, заключающемуся в провисании кожуха гидрогасителя вниз относительно его корпуса.

Рассматриваемый шуп можно усовершенствовать, применив ограничительные выступы на его измерительной линейке, на расстояниях, равных длинам кожухов различных гидравлических гасителей колебаний [11]. Благодаря этому станет ненужным двойное измерение внутри и снаружи кожуха. Подобная конструкция щупа представлена на рис. 4.

Методы борьбы с подкожуховым льдообразованием и их классификация

Подкожуховое льдообразование является негативным явлением, которое возникает при эксплуатации гидравлических гасителей колебаний в зимний период. Данное явление требует минимизации его влияния на работоспособность гидрогасителей или его устранения.

На сегодняшний день довольно активно стали применяться резиновые сильфоны вместо металлических кожухов. Известно несколько

конструкций гидравлических гасителей с резиновыми сильфонами [12]. Однако данное решение не лишено недостатков. Во-первых, корпус гидрогасителя может быть подвержен механическим повреждениям. Во-вторых, сильфоны выполнены из эластичных материалов, которые также могут быть легко повреждены.

Другим способом является установка на кронштейны крепления гидрогасителей снегоотражающих щитков, которые не позволяют потокам воздуха со снегом проникать в область под кожухом гидрогасителя. Недостатком такого решения может быть осложнение обслуживания гидрогасителей. Также данные щитки не могут обезопасить гидравлические гасители от всасывания воздуха со снегом в процессе работы на растяжение. На рис. 5 показана схема установки снегоотражающих щитков.

В [13] предлагается конструкция гидравлического демпфера, где для обеспечения защиты от подкожухового льдообразования предлагается выполнять круговые канавки на поверхности корпуса демпфера и устанавливать защитное кольцо из неметаллических материалов.

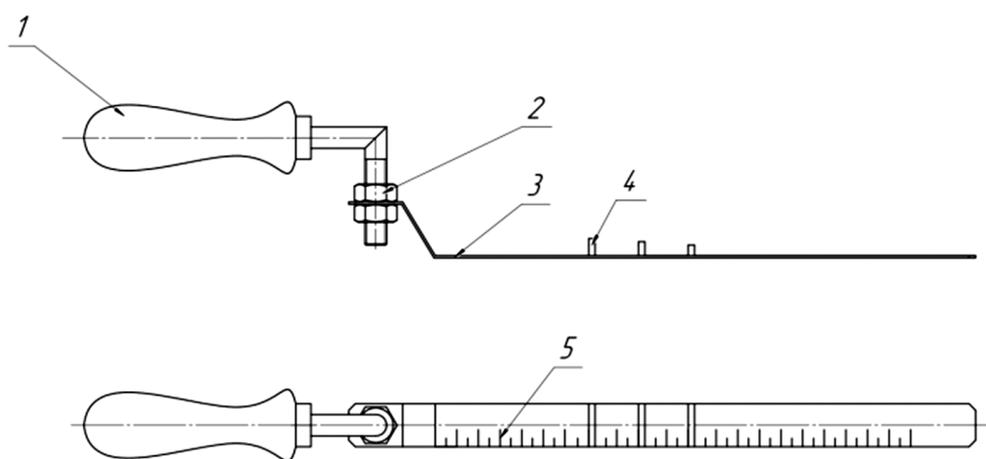


Рис. 4. Конструкция усовершенствованного щупа для выявления подкожухового льдообразования:

- 1 — рукоять; 2 — болтовое соединение; 3 — измерительная линейка;
4 — ограничительные выступы; 5 — измерительная шкала. Источник: [11]

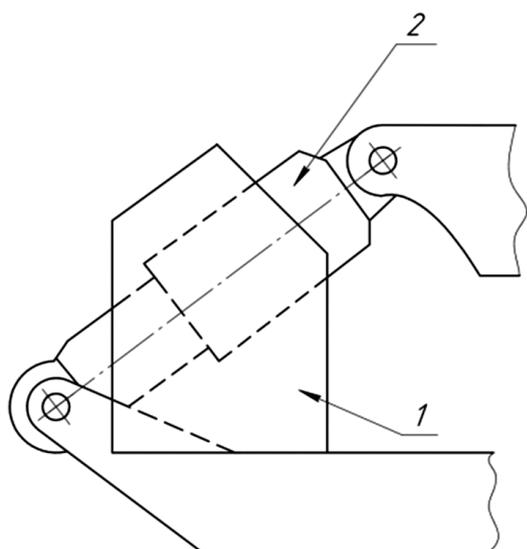


Рис. 5. Установка снегоотражающих щитков:

- 1 — снегоотражающий щиток;
2 — гидrogаситель. Источник: [10]

Существенным недостатком предлагаемой конструкции может быть появление зазора между защитным кольцом и кожухом гасителя вследствие износа.

Известна конструкция гидравлического гасителя [14], включающая металлический кожух и эластичный сильфон в виде внутреннего кожуха. Данное решение направлено на сочетание достоинств как металлического кожуха, так и сильфона. Однако эта конструкция не обеспечивает достаточную защищенность от подкожухового льдообразования, так как кожух указанной конструкции гидrogасителя обладает всеми недостатками, присущими стандартным металлическим кожухам гидrogасителей: незащищенностью от набегающих потоков воздуха со снегом и возможностью всасывания снега при разрежении воздуха в подкожуховой области на ходе растяжения гасителя. Схема конструкции данного гасителя показана на рис. 6.

Возможным способом решения проблемы подкожухового льдообразования может быть

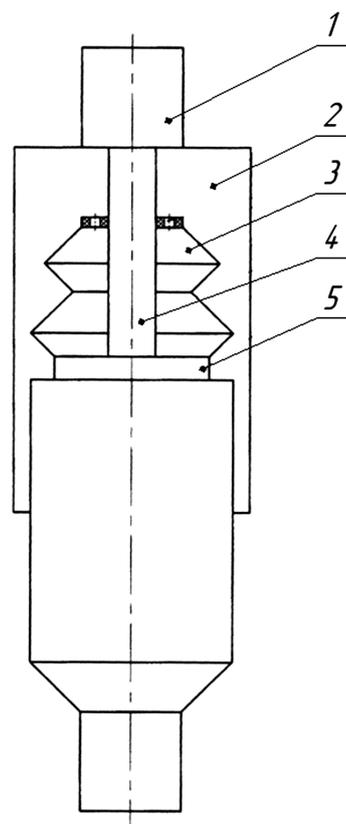


Рис. 6. Гидравлический демпфер конструкции

- ОАО «Транспневматика»: 1 — верхняя проушина; 2 — защитный кожух; 3 — эластичный кожух; 4 — шток; 5 — уплотнение штока. Источник: [14]

применение двойного защитного кожуха, состоящего из внешнего и внутреннего кожухов. Такая конструкция гасителя колебаний описана в [15]. Схема данного гасителя представлена на рис. 7.

Внутренний кожух данного гасителя имеет отверстия, благодаря которым происходит циркуляция воздуха из окружающей среды, что не допускает подкожуховое льдообразование. Однако данная конструкция обладает повышенной металлоемкостью, трудоемкостью изготовления, а также увеличенными габаритами из-за необходимости применения дополнительного защитного кожуха.

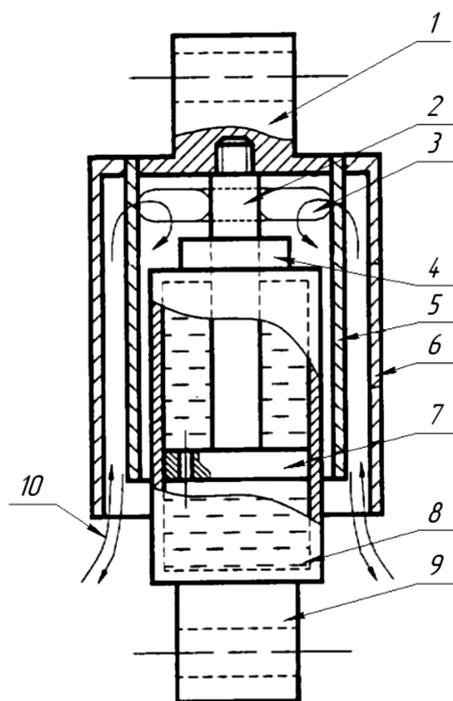


Рис. 7. Гаситель колебаний с отверстиями в защитном кожухе: 1 — верхняя проушина; 2 — шток; 3 — отверстия во внутреннем кожухе; 4 — защитные уплотнения; 5 — внутренний защитный кожух; 6 — внешний защитный кожух; 7 — поршень; 8 — корпус гасителя; 9 — нижняя проушина; 10 — направления движения воздуха.

Источник: [15]

Альтернативным решением может быть также полная герметизация защитного кожуха. Так, в [16] описывается конструкция гидравлического гасителя колебаний, суть которой заключается в применении герметичного внешнего защитного кожуха и удлиненного нижнего крепления, длина которого равна ходу поршня. В нижней части защитный кожух обладает сальниковым уплотнением. Защитный кожух данного гидрогасителя не допускает попадания в подкожуховую полость не только снега, но и различных абразивных частиц, которые при длительной эксплуатации гасите-

ля вызывают дополнительные износы штока и его уплотнений. Однако увеличенная длина гидрогасителя ограничивает его применение на железнодорожном подвижном составе.

Достаточно оригинальное техническое решение представлено в [17]. Суть предложенной защиты от подкожухового льдообразования заключается в том, что на поверхности корпуса и внутренней поверхности кожуха выполнены винтовые канавки противоположного направления. По замыслу авторов, данное решение обезопасит гидрогаситель от подкожухового льдообразования, так как в ходе эксплуатации будут возникать колебания гасителя, и канавки обеспечат возникновение аэродинамического затвора. Однако данное решение приведет к удорожанию конструкции гасителей и трудоемкости их изготовления.

Обобщая все вышесказанное, можно составить схему классификации методов борьбы с подкожуховым льдообразованием, которая изображена на рис. 8.

Заключение

Таким образом, подкожуховое льдообразование в гидравлических гасителях колебаний является достаточно опасным явлением при эксплуатации подвижного состава в зимний период. Это явление может не только заблокировать работу гидрогасителей, но и привести к их поломке. Исправная работа гидравлических гасителей колебаний напрямую влияет на работоспособность рессорного подвешивания подвижного состава. Поэтому работы, связанные с минимизацией влияния или устранения подкожухового льдообразования, являются достаточно актуальными. Однако существующие методы и способы борьбы с указанным явлением являются не полностью исчерпывающими, а значит, требуются дополнительные изыскания в данном направлении.



Рис. 8. Классификация методов борьбы с подкожуховым льдообразованием в гидравлических гасителях колебаний

Библиографический список

1. Челноков И.И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов. М.: Транспорт, 1975. 72 с.
2. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков [и др.]; под ред. И.В. Бирюкова. М.: Транспорт, 1992. 439 с.
3. Проблема надежности кожухов зубчатой передачи электровозов серии «Ермак» / Е.Ю. Дульский [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 4(60). С. 87–92. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).87-92
4. Оценка напряженно-деформированного состояния кожухов зубчатой передачи электровоза серии «Ермак» / И.О. Лобыцин [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 3(63). С. 119–126. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).119-126
5. Казорин П.С. Влияние отрицательных температур на работоспособность гидравлических амортизаторов перспективных гусеничных машин, предназначенных для использования в особо тяжелых природно-климатических условиях, в том числе Севера, Сибири и Дальнего Востока // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 5–6 (167–168). С. 141–148.
6. Домнышев Д.А. Обеспечение эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов автомобилей, используемых в сельском хозяйстве при низких температурах: дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2021. 119 с.

7. Моделирование работы резиновых уплотнений тормозной сети подвижного состава в условиях низких температур / Н. И. Мануилов [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3(55). С. 112–119.
8. Левит Г.М., Мамонтов С.В. Предотвращение льдообразования в гидrogасителях // Транспорт-2011: труды Всероссийской научно-практической конференции: в 3 ч. / под ред. А.Н. Гуда. Ростов н/Д.: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2011. Ч. 2. С. 313.
9. Стрельцов А. Ученые разработали методы борьбы с оледенением // Гудок. URL: <https://gudok.ru/content/zd/884155/> (дата обращения: 18.09.2024).
10. Соколов М. М., Варава В. И., Левит Г. М. Гасители колебаний подвижного состава: справочник. М.: Транспорт, 1985. 216 с.
11. Щуп для определения подкожухового льдообразования в гидравлических гасителях колебаний: патент на полезную модель № 228190 U1 Российская Федерация, МПК G01B 3/00. № 2024106657 / С. В. Трескин; заявл. 11.03.2024; опубл. 19.08.2024; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».
12. Гидравлический гаситель колебаний: патент на полезную модель № 89646 U1 Российская Федерация, МПК F16F 5/00. № 2009123603/22 / В. А. Николаев [и др.]; заявл. 19.06.2009; опубл. 10.12.2009; заявитель Балтийская производственная компания «Оквэй».
13. Гидравлический демпфер первой ступени рессорного подвешивания транспортного средства: патент на полезную модель № 131106 U1 Российская Федерация, МПК F16F 9/16, F16F 9/512. № 2013108272/11 / Ю.П. Бороненко, Г.М. Левит, С.В. Мамонтов; заявл. 25.02.2013; опубл. 10.08.2013; заявитель ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения».
14. Гидравлический демпфер: патент на полезную модель № 161086 U1 Российская Федерация, МПК F16F 9/42, F16F 9/32, F16F 9/16. № 2015127378/05 / В.А. Батенков [и др.]; заявл. 07.07.2015; опубл. 10.04.2016; заявитель ОАО «Транспневматика».
15. Гаситель колебаний: патент № 2213892 C2 Российская Федерация, МПК F16F 9/38. № 2001124577/28 / Э. П. Дергачев, В. И. Завгородний; заявл. 05.09.2001; опубл. 10.10.2003.
16. Гидравлический гаситель колебаний: авторское свидетельство № 1216475 A1 СССР, МПК F16F 5/00, F16F 9/38. № 3788790 / В. И. Завгородний, Ю. О. Фаерштейн; заявл. 12.09.1984; опубл. 07.03.1986; заявитель Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства.
17. Гидравлический гаситель колебаний: авторское свидетельство № 750171 A1 СССР, МПК F16F 5/00, F16F 9/18. № 2533048 / И. И. Челноков [и др.]; заявл. 17.10.1977; опубл. 23.07.1980; заявитель Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Академика В. Н. Образцова, Калининский ордена Ленина вагоностроительный завод.

Дата поступления: 03.10.2024

Решение о публикации: 08.11.2024

Контактная информация:

ТРЕСКИН Сергей Викторович — аспирант,

sergei.tresckin@yandex.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич — докт. техн. наук,

доцент, e.dulskiy@mail.ru

КРУЧЕК Виктор Александрович — докт. техн.

наук, профессор, victor.kruchek@yandex.ru

ИВАНОВ Павел Юрьевич — канд. техн. наук,

доцент, savl.ivanov@mail.ru

Review and classification of methods for combating internal ice formation in hydraulic vibration dampers of rolling stock

S.V. Treskin¹, E.Yu. Dul'skij¹, V.A. Kruchek², P.Yu. Ivanov¹

¹ Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia

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

For citation: *Treskin S. V., Dul'skij E. Yu., Kruchek V. A., Ivanov P. Yu.* Review and classification of methods for combating internal ice formation in hydraulic vibration dampers of rolling stock // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 825–834. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-825-834

Abstract

Purpose: consideration of the causes of internal ice formation in hydraulic vibration dampers and its effect on the performance of railway rolling stock. The article provides an overview of the mechanism of internal ice formation in hydraulic dampers, indicates methods for detecting this phenomenon, as well as negative factors caused by it, and considers methods of control. **Methods:** analysis of the mechanism of internal ice formation, analysis of methods for eliminating or minimizing the influence of internal ice formation on the reliability of hydraulic vibration dampers. **Results:** the main reason for the formation of internal ice formation is the incoming air flow with snow during the movement of rolling stock, which causes the accumulation of ice mass in the inner region of the hydraulic damper. Internal ice formation can lead to mechanical damage to the trolleys of rolling stock due to a decrease in the damping ability of hydraulic dampers or blocking of spring suspension. Damage to the rubber seals and cuffs of the dampers is also possible. The methods of detecting this phenomenon are considered. An improved probe for detecting internal ice formation is proposed. The technical proposals aimed at eliminating the described phenomenon are analyzed. Examples of designs of hydraulic vibration dampers using the described technical proposals are given. The classification of ways to combat internal ice formation is given. **Practical significance:** the necessity of improving hydraulic vibration dampers in order to minimize or eliminate the influence of internal ice formation is shown. The method of diagnosing internal ice formation is shown. An improved probe design has been demonstrated to detect this phenomenon. Various methods and methods have been demonstrated to minimize the impact or eliminate internal ice formation. The classification of methods for combating internal ice formation is given.

Keywords: spring suspension, rolling stock, hydraulic damper, hydro damper, hydraulic damper, internal ice formation, protective casing

References

1. Chelnokov I. I. *Gidravlicheskie gasiteli kolebaniy passazhirskih vagonov*. M.: Transport, 1975. 72 s. (In Russian)
2. *Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava* / I. V. Biryukov [i dr.]; pod red. I. V. Biryukova. M.: Transport, 1992. 439 s. (In Russian)
3. Problema nadezhnosti kozhuhov zubchatoj peredachi elektrovozov serii "Ermak" / E. Yu. Dul'skij [i dr.] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2018. No. 4(60). S. 87–92. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.4(60).87-92 (In Russian)
4. Ocenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kozhuhov zubchatoj peredachi elektrovoza serii "Ermak" / I. O. Lobycin [i dr.] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2019. No. 3(63). S. 119–126. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).119-126 (In Russian)
5. Kazorin P. S. Vliyanie otricatel'nyh temperatur na rabotosposobnost' gidravlicheskih amortizatorov perspektivnyh gusenichnyh mashin, prednaznachennyh dlya ispol'zovaniya v osobo tyazhelyh prirodno-klimaticheskikh usloviyah, v tom chisle Severa, Sibiri i Dal'nego Vostoka // *Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya*

16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2022. No. 5–6 (167–168). S. 141–148. (In Russian)

6. Domnyshev D.A. Obespechenie ekspluatatsionnykh harakteristik gidravlicheskih amortizatorov avtomobilej, ispol'zuemykh v sel'skom hozyajstve pri nizkikh temperaturah: diss. ... kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, 2021. 119 s. (In Russian)

7. Modelirovanie raboty rezinovykh uplotnenij tormoznoj seti podvizhnogo sostava v usloviyah nizkikh temperatur / N. I. Manuilov [i dr.] // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2017. No. 3(55). S. 112–119. (In Russian)

8. Levit G.M., Mamontov S. V. Predotvrashchenie l'doobrazovaniya v gidrogasitelyah // Transport-2011: trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii: v 3 ch. / pod red. A.N. Guda. Rostov n/D.: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2011. Ch. 2. S. 313. (In Russian)

9. Strel'cov A. Uchenye razrabotali metody bor'by s oledeneniem // Gudok. URL: <https://gudok.ru/content/zd/884155/> (data obrashcheniya: 18.09.2024). (In Russian)

10. Sokolov M.M., Varava V.I., Levit G.M. Gasiteli kolebanij podvizhnogo sostava: spravochnik. M.: Transport, 1985. 216 s. (In Russian)

11. Shchup dlya opredeleniya podkozhuhovogo l'doobrazovaniya v gidravlicheskih gasitelyah kolebanij: patent na poleznuyu model' No. 228190 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01B 3/00. No. 2024106657 / S.V. Treskin; zayavl. 11.03.2024; opubl. 19.08.2024; zayavitel' FGBOU VO "Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya". (In Russian)

12. Gidravlicheskiy gasitel' kolebanij: patent na poleznuyu model' No. 89646 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK F16F 5/00. No. 2009123603/22 / V.A. Nikolaev [i dr.]; zayavl. 19.06.2009; opubl. 10.12.2009; zayavitel' Baltijskaya proizvodstvennaya kompaniya «Okvej». (In Russian)

13. Gidravlicheskiy dempfer pervoj stupeni ressonnogo podveshivaniya transportnogo sredstva: patent na poleznuyu model' No. 131106 U1 Rossijskaya Federaciya,

MPK F16F 9/16, F16F 9/512. No. 2013108272/11 / Yu. P. Boronenko, G.M. Levit, S. V. Mamontov; zayavl. 25.02.2013; opubl. 10.08.2013; zayavitel' FGBOU VPO "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya". (In Russian)

14. Gidravlicheskiy dempfer: patent na poleznuyu model' No. 161086 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK F16F 9/42, F16F 9/32, F16F 9/16. No. 2015127378/05 / V. A. Batenkov [i dr.]; zayavl. 07.07.2015; opubl. 10.04.2016; zayavitel' OAO "Transpnevmatika". (In Russian)

15. Gasitel' kolebanij: patent No. 2213892 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK F16F 9/38. No. 2001124577/28 / E. P. Dergachev, V. I. Zavgorodnij; zayavl. 05.09.2001; opubl. 10.10.2003. (In Russian)

16. Gidravlicheskiy gasitel' kolebanij: avtorskoe svidetel'stvo No. 1216475 A1 SSSR, MPK F16F 5/00, F16F 9/38. No. 3788790 / V.I. Zavgorodnij, Yu. O. Faershtejn; zayavl. 12.09.1984; opubl. 07.03.1986; zayavitel' Proektno-konstruktorskoe byuro vagonnogo hozyajstva. (In Russian)

17. Gidravlicheskiy gasitel' kolebanij: avtorskoe svidetel'stvo No. 750171 A1 SSSR, MPK F16F 5/00, F16F 9/18. No. 2533048 / I. I. CHelnokov [i dr.]; zayavl. 17.10.1977; opubl. 23.07.1980; zayavitel' Leningradskij institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta im. Akademika V. N. Obrazcova, Kalininskij ordena Lenina vagonostroitel'nyj zavod. (In Russian)

Received: 03.10.2024

Accepted: 08.11.2024

Author's information:

Sergej V. TRESKIN — postgraduate student;

sergei.tresckin@yandex.ru

Evgenij Yu. DUL'SKIJ — Dr. Sci. in Engineering,

Associate Professor; e.dulskiy@mail.ru

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

Professor; victor.kruchek@yandex.ru

Pavel Yu. IVANOV — PhD in Engineering, Associate

Professor; savl.ivanov@mail.ru

УДК 629.4.072.2

Работа автотормозов грузового поезда при нарушении целостности тормозной магистрали

Д. В. Осипов¹, А. П. Буйносов², И. А. Кудьяров¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

² Уральский государственный университет путей сообщения, Россия, 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Для цитирования: Осипов Д. В., Буйносов А. П., Кудьяров И. А. Работа автотормозов поезда при нарушении целостности тормозной магистрали. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 835–845. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-835-845

Аннотация

Цель: исследование работы автотормозов грузового поезда при нарушении целостности тормозной магистрали. Данное исследование направлено на повышение безопасности движения, так как скорость принятия решений локомотивной бригадой при возникновении внештатных и аварийных ситуаций в пути следования является критически важным параметром для обеспечения безопасности движения поездов. Основная проблема состоит в том, что в некоторых случаях при обрыве тормозной магистрали грузового поезда по причине саморасцепа машинисты с небольшим опытом работы неправильно интерпретируют показания приборов. В совокупности с другими особенностями работы пневматических приборов автотормозов поезда проходит значительное время до принятия правильных решений. В результате могут происходить столкновения единиц подвижного состава. **Методы:** экспериментальное исследование особенностей работы пневматических приборов автотормозного оборудования грузового поезда. Анализ газодинамических процессов тормозной магистрали, тормозных цилиндров и главного резервуара. Физическое моделирование случая возникновения обрыва тормозной магистрали хвостового вагона поезда. **Результаты:** приведены результаты экспериментальных исследований работы автотормозов грузового поезда в случае нарушения целостности тормозной магистрали, рассмотрены особенности работы сигнализатора обрыва тормозной магистрали и уравнительной части крана машиниста усл. № 394/395 при питании утечки в результате обрыва тормозной магистрали. **Практическая значимость:** в результате проведенных экспериментальных исследований работы тормозной системы грузовых поездов при обрыве тормозной магистрали получены графики зависимости давления сжатого воздуха от времени в ключевых элементах тормозной системы грузовых поездов. Также получен график распределения давления в тормозных цилиндрах по длине поезда. Представленные в работе исследования позволят разрабатывать новые системы диагностики обрыва тормозной магистрали, дополнительно анализирующие расход воздуха из главных резервуаров.

Ключевые слова: автоматические тормоза, экстренное торможение, грузовый поезд, обрыв тормозной магистрали, дополнительная разрядка, газодинамические процессы

Введение

На отечественном грузовом подвижном составе применяется пневматическая автоматическая прямодействующая тормозная система. Свойство автоматичности подразумевает способность тормозной системы срабатывать на торможение при обрыве тормозной

магистрала. До изобретения в 1980 году сигнализатора обрыва тормозной магистрали поезда [1] локомотивная бригада могла определить обрыв по нескольким признакам.

Первый из них — это снижение скорости движения. Однако это также могло быть связано с возникновением продольной динамики в поезде, вследствие чего воздушная волна ударяла по магистральной диафрагме продольно расположенного относительно оси пути воздухораспределителя [2]. Либо могло произойти кратковременное ослабление сомкнутых головок соединительных рукавов. Далее вследствие утечки воздуха и дополнительной разрядки магистральной камеры воздухораспределитель может сработать на торможение. Отличить самоторможение вследствие продольной динамики от самоторможения по причине обрыва тормозной магистрали можно за счет возрастания скорости движения до начального значения.

Следующий признак — более частое срабатывание компрессора. Основная проблема диагностирования таким способом заключается в том, что причиной может являться потеря плотности в питательной магистрали в случае нарушения ее целостности. В зимнее время наблюдается частое перемерзание главных резервуаров и уменьшение их объема, из-за чего воздух расходуется быстрее. Также это может быть связано со свойствами прямодействия тормозной системы, другими словами, подпиткой утечек при помощи уравнительной части крана машиниста усл. № 394/395. Утечка, кроме обрыва, может образовываться и в результате повреждения уплотнительных манжет межвагонных соединений в процессе движения, а в зимнее время наблюдается потеря их эластичности в связи с понижением температуры наружного воздуха [3].

Внедрение датчика обрыва тормозной магистрали усл. № 418 несколько облегчило процесс диагностирования ее целостности. При возникновении такой ситуации на пульте машиниста загорается сигнальная лампа «ТМ». Машинист в случае возникновения подозрений на обрыв обязан отключить тягу, выполнить диагностику целостности тормозной магистрали путем перевода ручки крана машиниста в положение «Перекрыша без питания» на 5–7 секунд [4]. Видя по манометру уравнительного резервуара и тормозной магистрали быстрый темп снижения давления, выполнить полное служебное торможение на величину первой ступени, то есть на 0,04–0,09 МПа в зависимости от массы поезда и профиля пути [5]. Однако некоторые особенности работы датчика усл. № 418 и крана машиниста усл. № 394/395 могут ввести неопытных машинистов в заблуждение. Вследствие чего проходит значительное время до принятия правильных решений, регламентированных инструкцией [4], что может приводить к столкновениям грузовых поездов и вагонов этого же состава, оставленных на перегоне в результате саморасцепа.

Например, известен случай, произошедший 20 января 2008 года на перегоне Великий Устюг — Красавино, в результате которого допущено столкновение грузового поезда № 3592 с двумя полувагонами, оставленными на перегоне локомотивной бригадой после саморасцепа в поезде № 3591 [6]. При этом также известен и ряд других аналогичных случаев.

По этой причине необходимо рассмотреть принцип работы датчика усл. № 418, соотнести с экспериментальными исследованиями газодинамических процессов, протекающих в тормозной системе при нарушении целостности тормозной магистрали, и с особенностями работы крана машиниста усл. № 394/395.

Работа автотормозов грузового поезда при нарушении целостности тормозной магистрали

Так как датчик усл. №418 является первым прибором, оповещающим локомотивную бригаду о случаях нарушения целостности тормозной магистрали, то исследование принципа работы тормозной системы при возникновении таких ситуаций начнем с рассмотрения принципа работы датчика (рис. 1). Как известно, данный прибор устанавливается между двухкамерным резервуаром и главной частью воздухораспределителя усл. №483, установленного на локомотиве [7, 8], так как помимо сигнализатора обрыва, также выполняет функции отключения тяги.

При образовании значительной утечки вследствие самопроизвольного открытия концевых кранов или обрыва тормозной магистрали, запасенный в магистрали объем сжатого воздуха начинает разряжаться в атмосферу. Это вызывает прогиб магистральной

диафрагмы и срабатывание клапана дополнительной разрядки воздухораспределителя. При достижении давления сжатого воздуха $P_{\text{КДР}}$ в канале дополнительной разрядки датчика до значений 0,11–0,13 МПа [7] левая диафрагма прогибается вниз, воздействуя на шайбу и толкатель, в результате чего последний замыкает пару контактов К1–К2 микропереключателя.

Через нормально замкнутую пару контактов К3–К4 правой диафрагмы (которая служит для размыкания цепи питания катушки P после воздействия давления $P_{\text{ТЦ}}$ из тормозного цилиндра) запитывается катушка P и замыкается контакт P_1 , вследствие чего на пульте машиниста загорается сигнальная лампа «ТМ», которая не гаснет после прекращения дополнительной разрядки и снижения давления в канале дополнительной разрядки датчика. После выполнения машинистом ступени торможения согласно инструкции [4] в тормозном цилиндре локомотива давление составит не менее

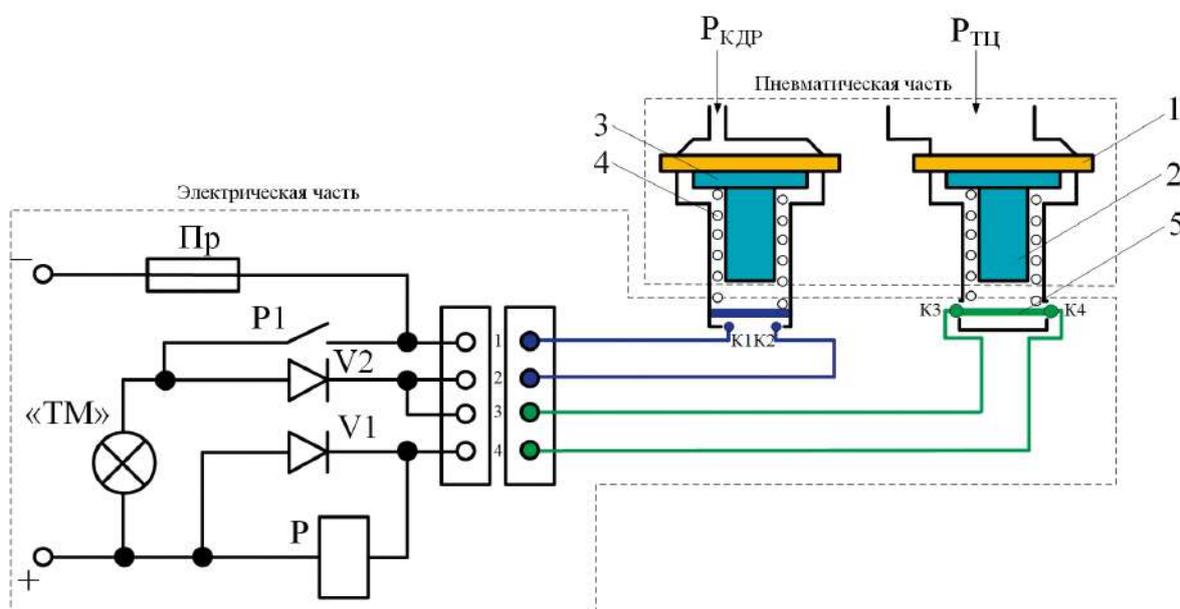


Рис. 1. Упрощенная схема конструкции сигнализатора обрыва тормозной магистрали поезда:
1 — диафрагма; 2 — толкатель; 3 — шайба; 4 — пружина; 5 — контакты микропереключателя

0,05 МПа. Давлением $P_{тц}$ правая диафрагма прогибается, толкатель, воздействуя на микропереключатель, разрывает цепь сигнальной лампы «ТМ», и она гаснет.

Это свидетельствует о нормальном режиме работы сигнализатора обрыва тормозной магистрали, однако может вводить в заблуждение неопытных машинистов, потому как лампа гаснет самопроизвольно до осуществления машинистом управляющих воздействий на кран машиниста усл. №394/395, что связано с его свойствами.

Свойство прямодействия или неистощимости тормозной системы определяется конструктивными особенностями крана машиниста. Любое нарушение плотности, в том числе по причине обрыва тормозной магистрали или самопроизвольного открытия концевых кранов, уравнивательная часть крана машиниста усл. №394/395 пытается компенсировать. Упрощенная схема конструкции уравнивательной части приведена на рис. 2.

Уравнивательный поршень 1 выполняет роль пневматического реле. В качестве входных сигналов для его работы служат давления в уравнивательной камере (УК) над поршнем со стороны питательной магистрали и редуктора и в камере под поршнем со стороны тормозной магистрали. При равенстве сил действия давления над поршнем и под ним двухседельчатый клапан 2 остается закрытым.

В результате возникновения утечки, давление в тормозной магистрали падает. Так как магистраль связана с уравнивательной камерой, давление в ней тоже снижается. Нарушение баланса сил, действующих на поршень, приводит к тому, что под действием преобладающей силы со стороны питательной магистрали поршень опускается вниз, отжимая двухседельчатый клапан и открывая тем самым канал впускного клапана для подпитки тормозной магистрали. Как только давление в тормозной магистрали достигнет давления в уравнивательной камере, установленного при помощи

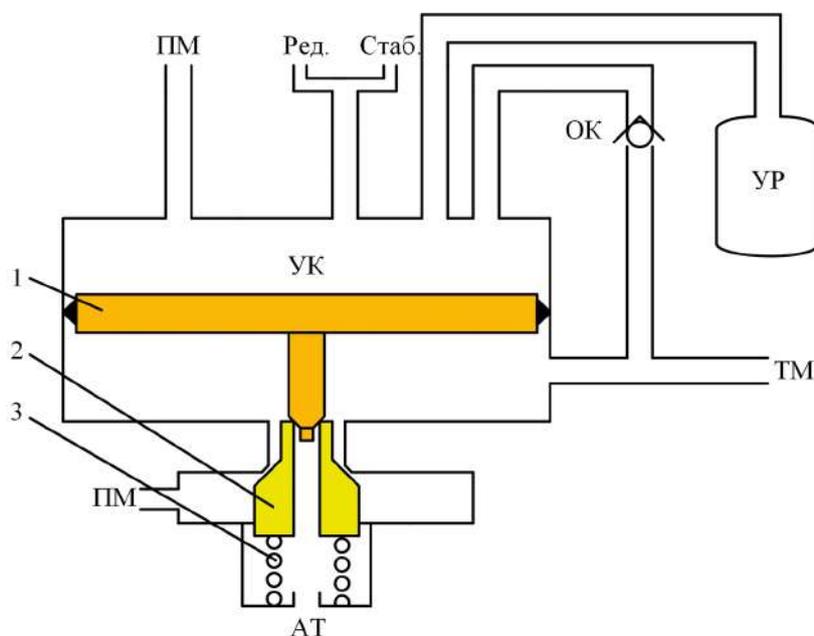


Рис. 2. Упрощенная схема конструкции уравнивательной части крана машиниста усл. №394/3951:
1 — уравнивательный поршень; 2 — двухседельчатый клапан; 3 — возвратная пружина

редуктора на уровне зарядного, то двухседельчатый клапан при помощи возвратной пружины 3 возвращается в исходное положение.

Пневматические процессы при нарушении целостности тормозной магистрали

На грузовом поезде, состоящем из 70 вагонов и локомотива серии ЗЭС5К, оборудованном грузовыми воздухораспределителями усл. №483М и краном машиниста усл. №395М, в летний период времени был проведен эксперимент, суть которого заключалась в исследовании особенностей работы тормозной системы в случае возникновения обрыва тормозной магистрали. Обрыв имитировался открытием концевого крана 70-го вагона. В результате эксперимента были получены графики зависимости давления сжатого воздуха от времени в ключевых элементах тормозной системы, таких как питательная магистраль, тормозная

магистраль и тормозные цилиндры головного и хвостового вагона (рис. 3).

На данном графике цветными пунктирными линиями обозначены моменты времени: t_1 — момент открытия концевого крана хвостового вагона; t_2 — момент перевода ручки крана машиниста в положение, не обеспечивающее поддержание заданного давления в тормозной магистрали (перекрышка без питания).

По графику видно, что в момент времени t_1 воздухораспределитель хвостового вагона мгновенно срабатывает на торможение. Через 3 с воздушная волна доходит до головного вагона и локомотива. В момент снижения давления в тормозной магистрали первого вагона и локомотива вследствие осуществления дополнительной разрядки воздухораспределителем, срабатывает сигнализатор обрыва тормозной магистрали и загорается сигнальная лампа «ТМ» на пульте машиниста. Однако через 1,5 с она погаснет, по причине того, что давление

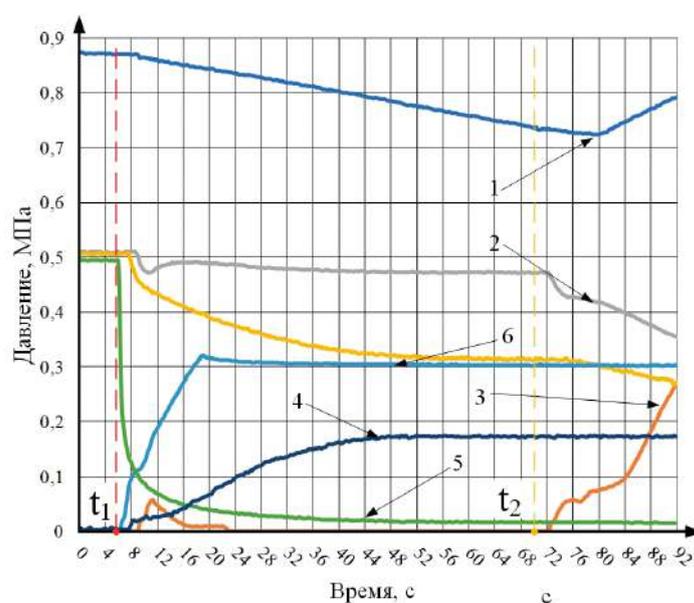


Рис. 3. График зависимости давления в элементах тормозной системы грузового поезда от времени: 1 — давление в питательной магистрали; 2, 5 — давление в тормозной магистрали головного и хвостового вагона соответственно; 3, 4, 6 — давление в тормозном цилиндре головного, среднего и хвостового вагона соответственно

в тормозном цилиндре достигает величины 0,06 МПа. Но уже через 5–6 с давление тормозного цилиндра вновь снижается практически до атмосферного.

В это же время уравнительная часть крана машиниста реагирует на утечку. Давление в тормозной магистрали повышается и воздухораспределитель срабатывает на отпуск тормозов. Здесь также можно обратить внимание на некоторую инерционность в срабатывании уравнительной части при подпитке утечки. Период времени между моментами начала разрядки и повышения давления в тормозной магистрали первого вагона составил 2 с. Причина этого кроется в том, что в качестве пневматического реле используется уравнительный поршень, для уплотнения которого применяются резиновая манжета и латунное кольцо. Сила трения между этими элементами и латунной втулкой в корпусе вызывает дополнительное сопротивление движению поршня, из-за чего нужна разница давлений между камерой над поршнем и под ним не менее 0,02 МПа, для того чтобы поршень пришел в движение.

Данная особенность работы крана машиниста не позволяет предотвращать самопроизвольные срабатывания тормозов, что вызывает дополнительные задержки поездов от снижения скорости или остановки по причине срабатывания датчика усл. №418. Предлагаемая в работе [9] конструкция крана машиниста усл. №394/395 с диафрагменным пневматическим реле позволит минимизировать последствия от перепадов давления в тормозной магистрали. Однако это может привести к тому, что при обрыве кран машиниста после достижения воздушной волной головной части поезда мгновенно сработает на питание утечки, не позволяя воздухораспределителю осуществить дополнительную разрядку. Следовательно, датчик обрыва не покажет нарушение целостности тормозной магистрали.

После отпуска тормозов в первых вагонах поезда повторного торможения не происходит. По истечении 34 с после начала эксперимента (с момента времени t_1) тормозная система переходит в установившийся режим движения воздуха. Это говорит о том, что впускной клапан обладает достаточно большим проходным

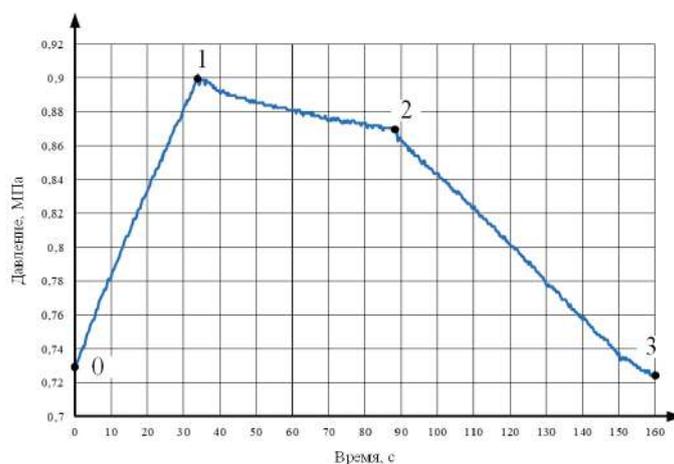


Рис. 4. График зависимости давления питательной магистрали от времени:

0–1 — откачка питательной магистрали компрессором; 1–2 — питание естественных утечек;
2–3 — утечка вследствие открытия концевого крана

сечением, а объема главных резервуаров хватает, чтобы более 60 с в тормозной магистрали первой части состава поддерживалось давление на 0,02 МПа ниже зарядного, что, вероятно, несколько ниже чувствительности воздухо-распределителя.

Проанализировав график зависимости давления питательной магистрали от времени (рис. 4), становится очевидным, что тормозная система в таком режиме работы будет оставаться неограниченно долгое количество времени.

Это связано с тем, что производительность мотор-компрессора значительно выше, чем интенсивность образовавшейся утечки. Так, темп роста давления в питательной магистрали (участок 0–1) при работе компрессора составил 0,17 МПа за 33 с, то есть 0,005 МПа/с. В это же время давление вследствие открытия концевого крана (участок 2–3) снизилось с 0,87 МПа до 0,72 МПа за 70 с, то есть темп утечки сжатого воздуха составляет 0,002 МПа/с, что в 2,5 раза медленнее, чем скорость восстановления давления.

Результатом является то, что эффективность автоматического торможения в случае, если машинист по каким-то причинам не приведет в действие тормоза поезда согласно инструкции [4], значительно снижается. На рис. 5

изображено распределение давления в тормозных цилиндрах от времени в зависимости от длины поезда.

Данная зависимость наглядно показывает, что по истечении 20 с после возникновения обрыва тормозной магистрали хвостовой части поезда давление в тормозных цилиндрах первой его половины составляет порядка 30% от номинального. Через 44 с наблюдается установившийся уровень давления в тормозных цилиндрах, но эффективность торможения после 35-го вагона не превышает 50%. Как уже было сказано ранее, дальнейшего увеличения тормозного эффекта наблюдать не будет, так как производительность компрессора значительно выше интенсивности образовавшейся утечки.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований газодинамических процессов в тормозной магистрали при физическом моделировании нарушения целостности трубопровода получены графики зависимости давления сжатого воздуха от времени в различных элементах тормозной системы поезда. Анализ полученных зависимостей показал, что с учетом конструктивных особенностей работы сигнализатора обрыва тормозной магистрали с датчиком усл. №418 и уравнительной части

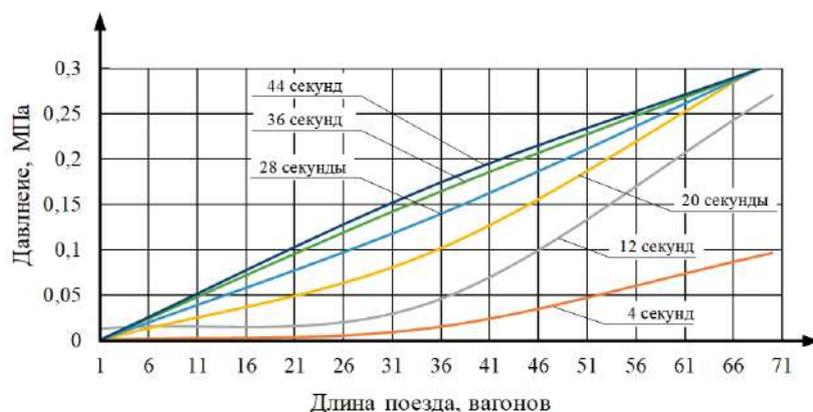


Рис. 5. График зависимости давления в тормозных цилиндрах от длины поезда в вагонах

крана машиниста (общих для всех единиц грузового тягового подвижного состава) в совокупности со случаями, когда производительность мотор-компрессора выше, чем скорость истечения воздуха из магистрали при обрыве, и эффективность самоторможения поезда падает, неопытному машинисту становится сложнее почувствовать поведение поезда. В результате этого проходит значительное время до начала выполнения действий, регламентированных инструкцией [4]. Итогом является снижение безопасности движения поездов с последующими экономическими затратами на восстановление объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Сигнализатор обрыва тормозной магистрали с датчиком усл. №418 может срабатывать не только по причине нарушения целостности трубопровода, но и вследствие дополнительной разрядки воздухораспределителя в качестве реакции на возникновение продольной динамики в поезде. В большинстве случаев срабатывание происходит именно по причине возникновения продольной динамики [10]. При этом снижения давления в главных резервуарах не наблюдается и срабатывания мотор-компрессора не произойдет. Более того, в случае нарушения целостности тормозной магистрали локомотивной бригаде требуется длительное время, чтобы установить, что за аналогичный период времени увеличилось количество запусков мотор-компрессора. По этой причине одним из путей решения проблемы существующих методов диагностики обрыва тормозной магистрали является разработка систем нового поколения, дополнительно анализирующих расход воздуха из главных резервуаров [11–15].

Ввиду ограниченности времени проведения экспериментальных исследований особенностей работы тормозной системы в случае воз-

никновения обрыва, было принято решение проводить исследования только для случая нарушения целостности тормозной магистрали хвостового вагона, как для случая с наибольшим временем распространения тормозной волны от хвостовой части состава к головной. В будущем планируется проведение аналогичных исследований для случаев обрыва тормозной магистрали в других частях поезда.

Библиографический список

1. Сигнализатор обрыва тормозной магистрали поезда: авторское свидетельство № 766925 А1 СССР, МПК В60Т 17/22. № 2632799 / М. И. Глушко; заявл. 26.06.1978; опубл. 30.09.1980; заявитель Уральское отделение Всесоюзного Ордена Трудового Красного знамени научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. EDN CCMXED
2. Процесс самопроизвольного срабатывания пневматических тормозов грузового подвижного состава / П. Ю. Иванов [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 1(65). С. 60–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).60-66. EDN BYOHMJ
3. Мануилов Н. И., Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю. Моделирование работы резиновых уплотнений тормозной сети подвижного состава в условиях низких температур // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3(55). С. 112–119. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).112-119. EDN ZIBFJV
4. О вводе в действие Регламента взаимодействия работников, связанных с движением поездов, с работниками локомотивных бригад при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 12.12.2017 № 2580р.
5. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. 2014.

6. Телеграмма ОАО «РЖД» №833. URL: <http://scbist.com/narusheniya-bezopasnosti-na-zh-d-do-2010-goda/6643-20-yanvaryu-2008-stolknovenie-na-peregone-velikii-ustyug-krasavino-szhd-print.html?ysclid=lwisg64w2d455807308>
7. Крылов В.И., Крылов В.В. Автоматические тормоза подвижного состава: учебник для учащихся техникумов ж. д. трансп. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 360 с.
8. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2006. 392 с.
9. Определение причин самопроизвольных срабатываний тормозов поезда в границах Красноярской железной дороги / П.Ю. Иванов [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. №3 (59). С. 68–76. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).68-76. EDN YSFXTV
10. Исследование причин самопроизвольного срабатывания автотормозов грузовых поездов / П. Ю. Иванов [и др.] // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 2. С. 399–403. EDN YUCVXJ
11. Контур ликвидации сверхзарядного давления воздухораспределителя подвижного состава железных дорог / Н.Л. Михальчук [и др.] // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. №1(61). С. 82–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).82-90. EDN WBENWV
12. Зарубежный опыт повышения эффективности пневматических тормозов / П.Ю. Иванов [и др.] // Локомотив. 2020. №11(767). С. 36–37. EDN BFVAJH
13. Способ интеллектуальной диагностики тормозной сети поезда и устройство для его реализации: патент №2662295 С2 Российская Федерация, МПК В60Т 17/22. №2016137211 / П.Ю. Иванов [и др.]; заявл. 16.09.2016; опубл. 25.07.2018; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»(ФГБОУ ВО ИрГУПС). EDN GTHEKU
14. Иванов П.Ю. Разработка теории упрощенных математических моделей пневматических процессов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. №4(92). С. 164–174. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_4_164. EDN RGLCPR
15. Система диагностики тормозной сети поезда / А.М. Худогов [и др.] // Локомотив. 2019. №4(748). С. 30–31. EDN SICTRM

Дата поступления: 14.08.2024

Решение о публикации: 21.10.2024

Контактная информация:

ОСИПОВ Дмитрий Валерьевич — аспирант,
osipovdnor@mail.ru

БУЙНОСОВ Александр Петрович — докт. техн. наук, профессор, byinosov@mail.ru

КУДЬЯРОВ Иван Александрович — студент,
mr.licrimovor@yandex.ru

Operation of auto brakes of a freight train in case of violation of the integrity of the brake line

D.V. Osipov¹, A. P. Buinosov², I.A. Kudyarov¹

¹ Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, Russia

² Ural State University of Railway Transport, 66 Kolmogorova st., Ekaterinburg, 620034, Russia

For citation: *Osipov D.V., Buinosov A. P., Kudyarov I. A.* Operation of auto brakes of a freight train in case of violation of the integrity of the brake line. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 835–845. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-835-845

Abstract

Purpose: in case of emergency and emergency situations along the route, the speed of decision-making by the locomotive crew is a critically important parameter in ensuring the safety of railway transport. The main problem is that in some cases, such as the breakage of the brake line of a freight train due to self-disconnection, young drivers incorrectly interpret the readings of the breakage alarm. Together with some other features of the operation of pneumatic devices for train brakes, it takes a considerable time before making the right decisions. As a result, collisions of rolling stock units may occur. **Results:** this article presents the results of experimental studies of the operation of truck train brakes in the event of a violation of the integrity of the brake line. The features of the operation of the brake line break alarm and the equalizing part of the crane of the driver of the service No. 394/395 when feeding a leak as a result of a brake line break are considered. **Practical significance:** as a result of experimental studies of the operation of the braking system of freight trains in case of a brake line breakage, graphs of the dependence of compressed air pressure on time in key elements of the braking system of freight trains were obtained. A graph of the dependence of the pressure in the brake cylinders on the length of the train in the wagons is also obtained.

Keywords: automatic brakes, emergency braking, freight train, brake line breakage, additional discharge, gas dynamic processes

References

1. Signalizator obryva tormoznoj magistrali poezda: avtorskoe svidetel'stvo № 766925 A1 SSSR, MPK B60T 17/22. № 2632799 / M. I. Glushko; yayavl. 26.06.1978; opubl. 30.09.1980; yayavitel' Ural'skoe otdelenie Vsesoyuznogo Ordena Trudovogo Krasnogo znamenija nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. EDN CCMXED (In Russian)
2. Process samoproizvol'nogo srabatyvaniya pnevmaticheskikh tormozov gruzovogo podvizhnogo sostava / P. Yu. Ivanov [i dr.] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie.* 2020. No. 1(65). S. 60–66. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).60-66. EDN BYOHMJ (In Russian)
3. Manuilov N.I., Ivanov P.Yu., Dul'skij E. Yu. Modelirovanie raboty rezinovykh uplotnenij tormoznoj seti podvizhnogo sostava v usloviyah nizkikh temperatur // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie.* 2017. No. 3(55). S. 112–119. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).112-119. EDN ZIBFJV (In Russian)
4. O vvode v dejstvie Reglamenta vzaimodejstviya rabotnikov, svyazannyh s dvizheniem poezdov, s rabotnikami lokomotivnyh brigad pri voznikovenii avarijnyh i nestandartnyh situacij na putyakh obshchego pol'zovaniya infrastruktury OAO "RZHD" rasporyazhenie OAO "RZHD" ot 12 dekabrya 2017 g. № 2580r. (In Russian)
5. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami

zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. 2014. (In Russian)

6. Telegramma OAO "RZHD" №833. URL: <http://scbist.com/narusheniya-bezopasnosti-na-zh-d-do-2010-goda/6643-20-yanvarya-2008-stolknovenie-na-peregone-velikii-ustyug-krasavino-szhd-print.html?ysclid=lwisg64w2d455807308> (In Russian)

7. Krylov V.I., Krylov V.V. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: uchebnyy dlya uchashchihsya tekhnikumov zh. d. transp. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1983. 360 s. (In Russian)

8. Asadchenko V. R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: Uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta. M.: Marshrut, 2006. 392 s. (In Russian)

9. Opredelenie prichin samoproizvol'nykh srabatyvaniy tormozov poezda v granicach Krasnoyarskoj zheleznoj dorogi / P. Yu. Ivanov [i dr.] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2018. No.3 (59). S. 68–76. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).68-76. EDN YSFXTV (In Russian)

10. Issledovanie prichin samoproizvol'nogo srabatyvaniya avtotormozov gruzovykh poezdov / P. Yu. Ivanov [i dr.] // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*. 2017. T. 2. S. 399–403. EDN YUCVXJ (In Russian)

11. Kontur likvidacii sverhzharyadnogo davleniya vozduhoraspredelatelya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog / N.L. Mihal'chuk [i dr.] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2019. No.1(61). S. 82–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).82-90. EDN WBEHWV (In Russian)

12. Zarubezhnyy opyt povysheniya effektivnosti pnevmaticheskikh tormozov / P. Yu. Ivanov [i dr.] // *Lokomotiv*. 2020. No. 11(767). S. 36–37. EDN BFVAJH (In Russian)

13. Sposob intellektual'noj diagnostiki tormoznoj seti poezda i ustrojstvo dlya ego realizacii: patent №2662295 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK B60T 17/22. №2016137211 / P. Yu. Ivanov [i dr.]; zayavl. 16.09.2016; opubl. 25.07.2018; zayavitel' FGBOU VO "Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya" (FGBOU VO IrGUPS). EDN GTHEKU (In Russian)

14. Ivanov P. Yu. Razrabotka teorii uproshchennykh matematicheskikh modelej pnevmaticheskikh processov // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023. No.4(92). S. 164–174. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_4_164. EDN RGLCPR (In Russian)

15. Sistema diagnostiki tormoznoj seti poezda / A. M. Hudonogov [i dr.] // *Lokomotiv*. 2019. No. 4(748). S. 30–31. EDN SICTRM (In Russian)

Received: 14.08.2024

Accepted: 21.10.2024

Author's information:

Dmitry V. OSIPOV — Postgraduate Student,
osipovdnor@mail.ru

Alexander P. BUINOSOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor, byinosov@mail.ru

Ivan A. KUDYAROV — Student,
mr.licrimovor@yandex.ru

УДК. 624.131.431.3

Прогнозирование влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог предгорной и горной местности на территории Юго-Западного Кыргызстана

Э. М. Каримов

Ошский технологический университет Кыргызстана, Республика Кыргызстан, 723503, Ош, ул. Н. Исанова, 81

Для цитирования: Каримов Э. М. Прогнозирование влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог предгорной и горной местности на территории Юго-Западного Кыргызстана // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 846–855. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-846-855

Аннотация

Цель: обосновать прогнозирование влажности земляного полотна автомобильных дорог с учетом особенностей климатических условий на территории Юго-Западного Кыргызстана (ЮЗК) — одной из четырех природно-климатических провинций страны. Основной источник почвенной влаги — это атмосферные осадки. Осадки очень изменчивы во времени и пространстве на исследуемой территории, поэтому выявление их высотных зависимостей в горах представляет собой трудную задачу при недостаточном объеме исходных данных, на которые напрямую воздействует влагонакопление земляного полотна автомобильных дорог. Все инженерные мероприятия по управлению водно-тепловым режимом основаны на его регулировании, а также на ограничении доступа влаги в земляное полотно, причем правильное планирование этих мероприятий осуществляется только при условии тщательного установления источников увлажнения местности. **Методы:** прогнозирование влажности грунта земляного полотна с достаточной степенью достоверности позволяет прогнозировать весеннюю или осеннюю влажность грунта земляного полотна с помощью математически обоснованного анализа погодно-климатических факторов предгорной и горной зоны Юго-Западного Кыргызстана. **Результаты:** разработка методики прогнозирования влажности глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог 1-го типа местности. **Практическая значимость:** методика применяется при проектировании, а также в период эксплуатации дорожного покрытия на территории Юго-Западного Кыргызстана и с достаточной степенью достоверности позволяет прогнозировать весеннюю или осеннюю влажность грунта земляного полотна с помощью математически обоснованного анализа погодно-климатических факторов. Был проведен анализ прямых наблюдений влажности и температуры грунта, в ходе которого показано, что влажность и гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова связаны уравнением регрессии. В результате были получены уравнения для расчета относительной влажности грунта в предгорных и горных дорожно-климатических районах Юго-Западного Кыргызстана.

Ключевые слова: относительная влажность грунта, водно-тепловой режим, земляное полотно автомобильных дорог, атмосферные осадки, гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова

Введение

Климатические условия Кыргызстана выделяются своим разнообразием и контрастностью на разных высотах. В нижних частях

внешних горных хребтов ощущается засушливое влияние окружающих пустынь, тогда как на вершинах преобладают ледники и вечные

снега. Между этими зонами расположены переходные пояса, которые различаются по температурному режиму, количеству осадков и другим климатическим характеристикам [1].

На рис. 1 представлена зафиксированная мультиспутниковой моделью TMPA-3B43 (Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis) сумма годовых атмосферных осадков на территории ЮЗК за период наблюдений с 1990 по 2015 год, а на рис. 3 — за период наблюдений с 2015 по 2019 год [2–4]. Они показывают, что не вся территория покрыта одинаковыми нормами атмосферных осадков. Основной источник почвенной влаги — это атмосферные осадки, количество и распределение которых во вре-

мени зависит от климата данной местности [5–6]. Из этого делаем вывод, что показатели влажности грунтов [6–8] тоже будут различными. Естественно, на это влияют сложные горные рельефы местности. Эти непростые данные ставят задачу исследовать и составить прогнозирование влажности земляного полотна на автомобильных дорогах для территории Юго-Западного Кыргызстана.

Осадки считаются вторым по значимости климатическим фактором после температуры воздуха. Важную роль в создании благоприятного климата играет сочетание тепла и влаги. Однако осадки сильно варьируются в зависимости от времени и места, что затрудняет их анализ. Особенно сложно выявить зависимость

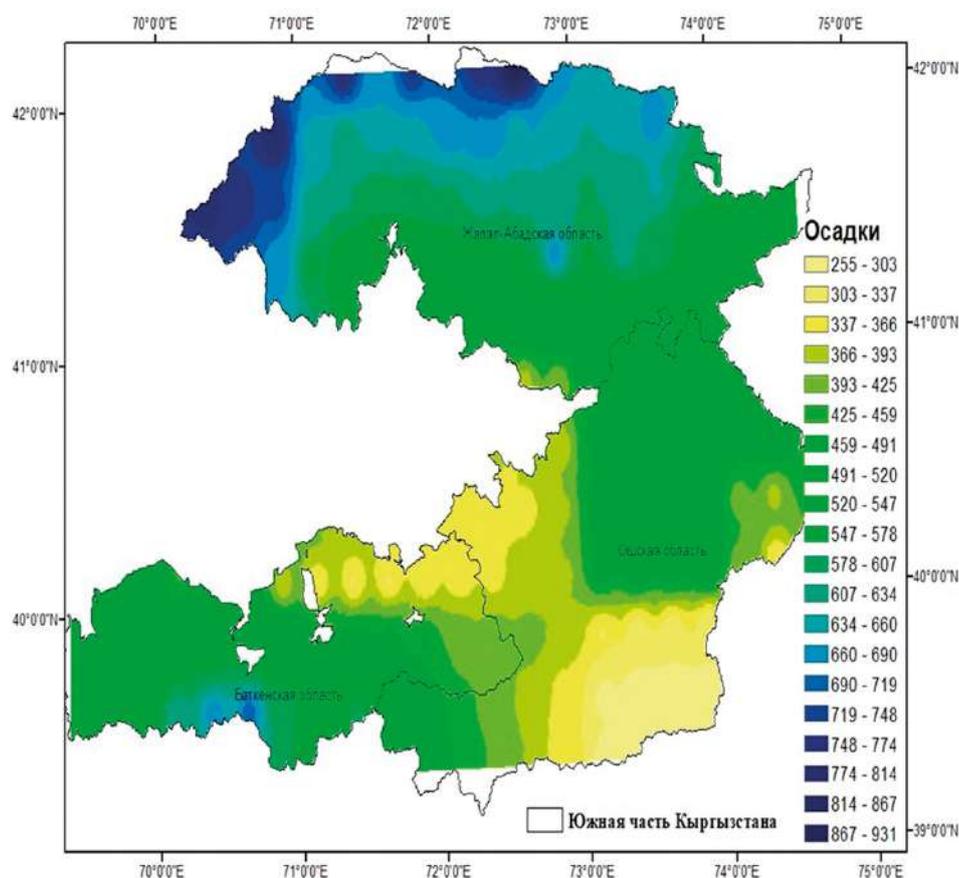


Рис. 1. Карта-схема сумм атмосферных осадков климатической провинции ЮЗК за период наблюдений с 1990 по 2015 год [2]

осадков от высоты в горах, где нехватка данных делает этот процесс еще более трудным [10]. Поэтому основными определяющими факторами придорожно-климатического районирования Кыргызской Республики (СНиП КР 32-01:2004 «Проектирование автомобильных дорог») являются абсолютная высота зоны над уровнем моря (м), а также годовое количество осадков (мм).

Все работы, связанные с регулированием водно-теплового режима, строятся на управлении этим режимом и ограничении доступа влаги в земляное полотно. Для успешного планирования таких мероприятий необходимо точно определить источники увлажнения и показатели влажности местности, что позволит правильно организовать инженерные решения [11]. Для определения показателей нормы атмосферных осадков на исследуемых участках автомобильных дорог можно использовать фрагменты из карты-схемы сумм атмосферных осадков климатической провинции ЮЗК со схемами автомобильных дорог (рис. 2) за периоды наблюдений с 1990 по 2015 год [2] и с 2015 по 2019 год (рис. 4).

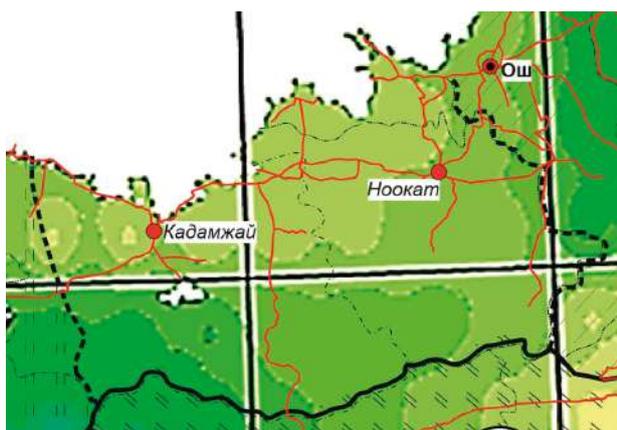


Рис. 2. Фрагмент из карты-схемы сумм атмосферных осадков климатической провинции ЮЗК за период наблюдений с 1990 по 2015 год со схемами автомобильных дорог

Методы и материалы исследования

На рис. 5 представлена гистограмма изменения коэффициента увлажнения гидротермического коэффициента (ГТК) Селянинова и среднегодовой температуры воздуха по маршруту исследования (по схемам автомобильных дорог, расположенных в V–IV дорожно-климатической зоне Кыргызской Республики, согласно СНиП КР 32-01:2004). Расчеты ГТК и температуры воздуха выполнены как средняя для каждого отрезка пункта маршрута исследования характеристика основных геокомплексов дорожных районов на территории Юго-Западного Кыргызстана.

В результате исследования процессов, приводящих к снижению прочности грунта в поверхностных слоях откоса полотна дороги научно-учебного полигона на сложных участках перевала Чыйырчык и на перевале Наукат, были определены такие метеорологические элементы, как увлажнение и температура воздуха.

Стоит отметить, что разрушения дорожного полотна в результате снижения прочности отмечались именно на тех участках маршрута исследования, где расчетные значения ГТК были 0,79 и выше. Так, на отрезке маршрута Ош — Наукат и перевале Чыйырчык, где были значительные разрушения дорожного полотна, они составляли 0,79 и 0,93 соответственно [12].

Для проверки значимости ГТК и температуры воздуха, которые влияют на прочностные характеристики грунта земляного полотна автомобильных дорог, проведен регрессионный анализ. Результат регрессионного анализа показал, что зависимость между этими метеорологическими элементами имеет уровень достоверности 73 % (рис. 4).

Линия аппроксимации описывает зависимость полиномиальной функцией 3-го порядка (табл. 1).

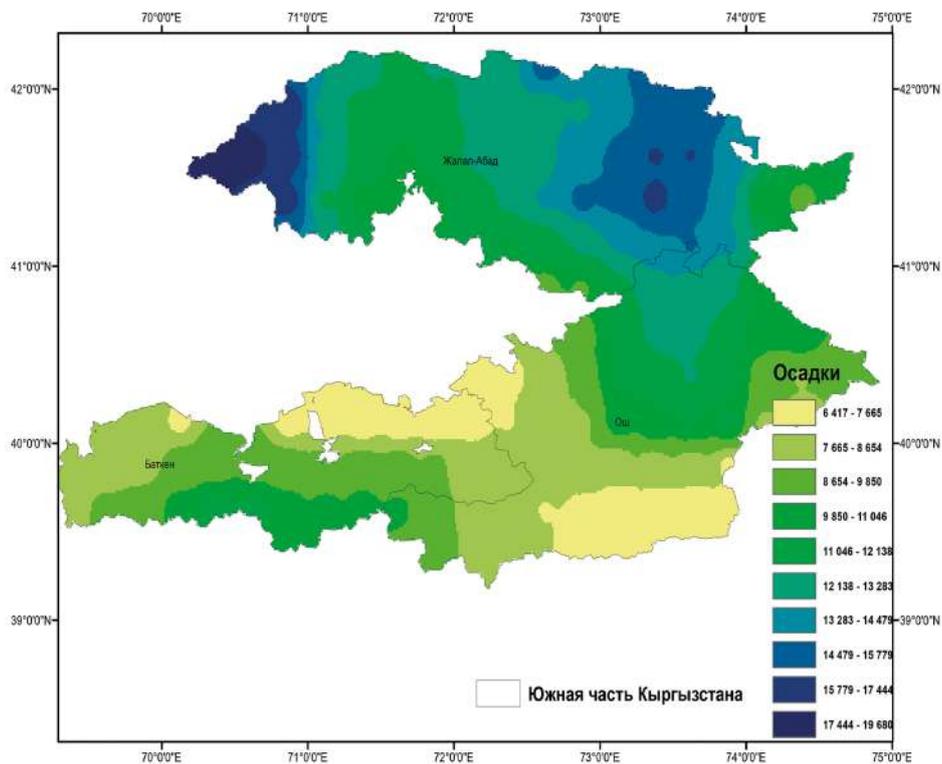


Рис. 3. Карта-схема сумм атмосферных осадков климатической провинции ЮЗК за период наблюдений с 2015 по 2019 год

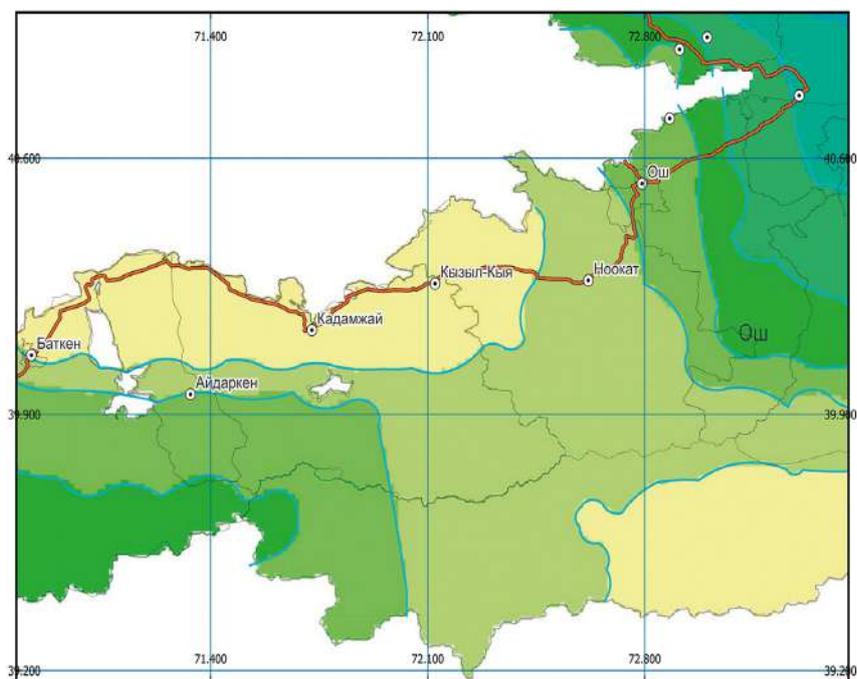


Рис. 4. Фрагмент из карты-схемы сумм атмосферных осадков климатической провинции ЮЗК за период наблюдений с 2015 по 2019 год со схемами автомобильных дорог

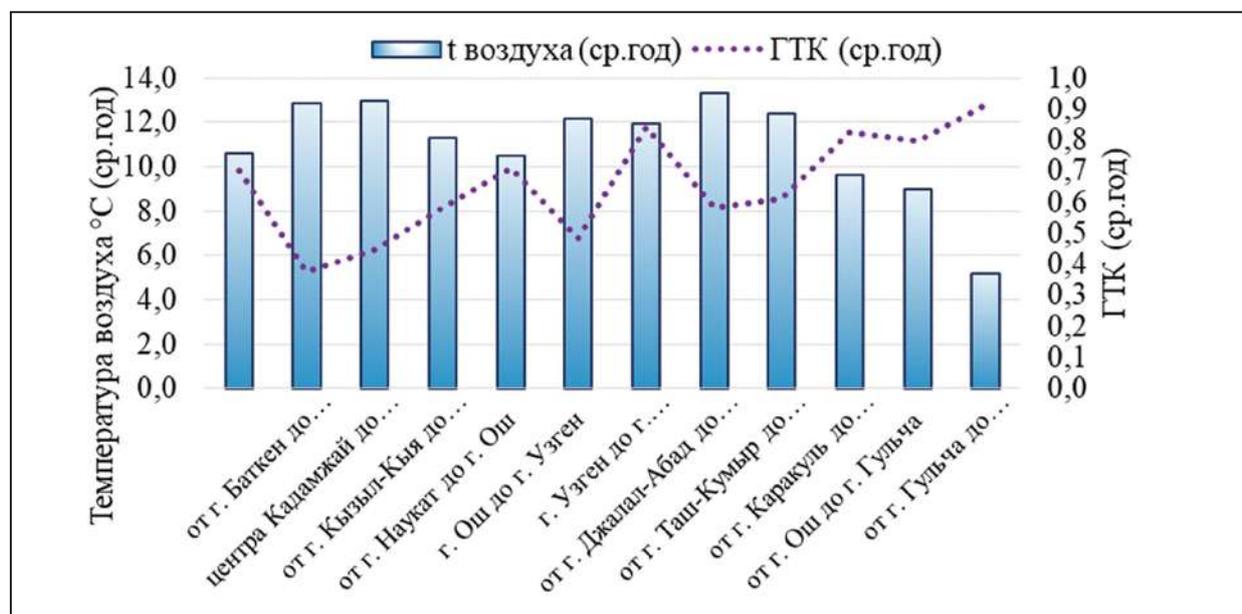


Рис. 5. Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) и среднегодовая температура воздуха для участков исследования (по схемам автомобильных дорог ЮЗК)

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетных значений ГТК и температуры воздуха

№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ГТК (ср. год)	0,70	0,38	0,45	0,58	0,71	0,48	0,84	0,58	0,61	0,83	0,80	0,91
t воздуха (ср. год)	10,60	12,84	12,95	11,30	10,50	12,16	11,93	13,29	12,38	9,61	8,98	5,16

На рис. 6 представлена точечная диаграмма зависимости ГТК и относительной влажности грунта земляного полотна, которая была определена в ходе полевых испытаний. Расчетные значения ГТК Селянинова для исследуемого участка автомобильных дорог V–IV дорожно-климатической зоны рассчитаны по многолетним метеорологическим данным температуры воздуха и осадков во внутригодовом распределении — в нашем случае с марта по ноябрь. По нашим исследованиям была определена зависимость прочностных характеристик грунта от относительной влажности грунта земляного полотна, достоверность которой оценивалась на уровне 80%. Поэтому было решено

проверить зависимость ГТК и относительной влажности грунта земляного полотна [13–15], так как известно, что ГТК Селянинова имеет прямую зависимость от температуры воздуха и осадков.

Результат определения зависимости указывает, что он имеет характер высокой тесной связи и описывается полиномиальной функцией с уравнением $y = 0,5025x^2 - 0,6217x + 0,9991$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0,88$, средняя ошибка аппроксимации 5,63 %). Достоверность значимости результатов регрессионного анализа — на уровне 90 % (табл. 2, рис. 7).

Результат последних расчетов позволил нам вывести уравнение для расчета относительной

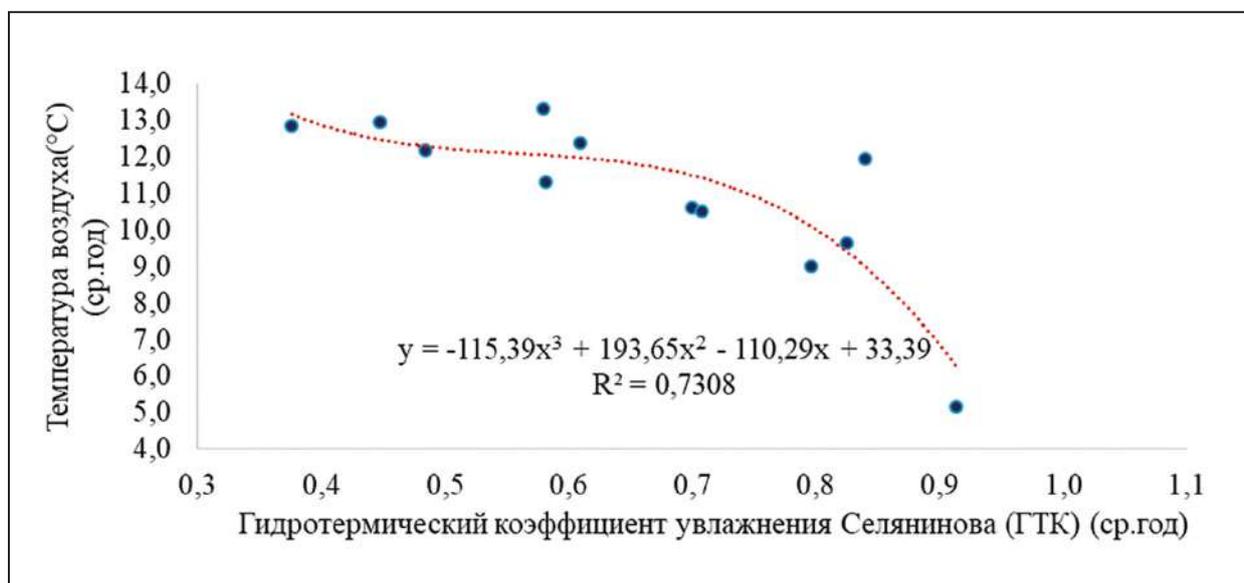


Рис. 6. Зависимость ГТК и температуры воздуха исследуемых участков маршрута

ТАБЛИЦА 2. Результаты лабораторных испытаний относительно влажности грунта и ГТК

Месяц	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
W отн. влаж. грунта	1,46	0,93	0,94	0,86	0,89	0,84	0,84
ГТК	1,71	1,30	0,61	0,31	0,17	0,22	0,95

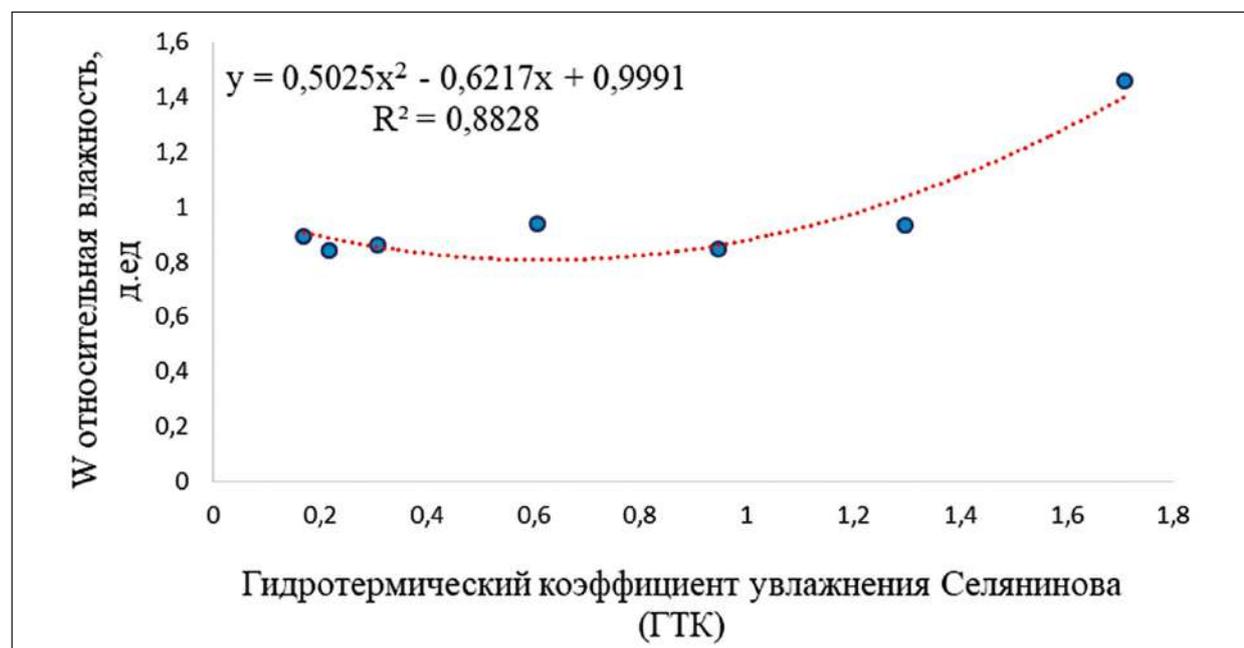


Рис. 7. Зависимость ГТК и относительной влажности грунта исследуемого участка маршрута

влажности грунта, который определяет прочностные характеристики грунта земляного полотна, используя расчетные значения ГТК Селянинова.

Уравнение квадратичной регрессии для расчета относительной влажности грунта имеет следующий вид:

$$W = 0,5025 \text{ ГТК}^2 - 0,6217 \text{ ГТК} + 0,9991,$$

где W — относительная влажность грунта;
ГТК — гидротермический коэффициент Селянинова для исследуемого участка.

Выводы

В ходе проведенных исследований было получено рабочее уравнение для расчета относительной влажности грунта с использованием расчетных значений гидротермического коэффициента Селянинова. Данное уравнение может быть рекомендовано проектировщикам автомобильных дорог для определения прочностных характеристик грунтов в IV–V дорожно-климатической зоне на территории Юго-Западного Кыргызстана.

Существующие расчетно-вероятностные методы прогнозирования влажности грунтов позволяют достаточно надежно определять характеристики грунтов в земляном полотне в течение периода между капитальными ремонтами дорожных покрытий. Однако эти методы не дают возможности точно определить, какой именно год межремонтного цикла будет расчетным.

Представленный метод прогнозирования влажности грунта земляного полотна позволяет с высокой степенью точности предсказывать влажность в весенний и осенний периоды. Это достигается посредством математически обоснованного анализа климатических и погодных условий предгорных и горных районов Юго-Западного Кыргызстана.

Таким образом, полученная зависимость позволяет прогнозировать влажность грунтов земляного полотна автомобильных дорог предгорной и горной местности Юго-Западного Кыргызстана.

Библиографический список

1. Агроклиматические ресурсы Ошской области Киргизской ССР. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 148 с.
2. Прикладное значение спутниковой модели ТМРА при установлении нормы годового количества атмосферных осадков по дорожно-климатическим зонам на территории Юго-Западного Кыргызстана / Ефименко В. Н [и др.] // Вестник ТГАСУ. 2021. № 4. С. 144–158.
3. Рыскаль М. О. Оценка сумм осадков на территории Кыргызстана по данным спутниковых наблюдений: дисс. ... канд. геогр. наук. Бишкек, 2020. 173 с.
4. Рыскаль М. О. Спутниковые карты годовых и сезонных сумм осадков для территории Кыргызстана // Материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 15-летию ЦАИИЗ «Дистанционные и наземные исследования земли в Центральной Азии». Бишкек, 2019. С. 206–213.
5. Каримов Э. М. Определение расчетной влажности грунтов в естественном залегании по экспериментальным данным относительно высотных отметок рельефа Кыргызстана // Вестник КРСУ. 2022. Т. 8. № 12. С. 140–151.
6. Каримов Э. М. Влияние водно-теплового режима на техническое состояние земляного полотна автомобильных дорог в условиях V дорожно-климатической зоны Кыргызстана // Вестник ТГАСУ. 2020. № 1. С. 193–204.
7. Гнездилова С. А. Прогнозирование влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог для целей проектирования и эксплуатации на территории Белгородской области // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 5. С. 36–38.

8. Ефименко В. Н. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог при глубоком промерзании грунтов (на примере юго-востока Западной Сибири): дисс. ... канд. техн. наук. М., 1978. 216 с.
9. Пономаренко П. Н. Атмосферные осадки Киргизии. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 129 с.
10. Подрезов О. А. Горная климатология и высотная климатическая зональность Кыргызстана. Бишкек, 2014. 169 с.
11. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / под. ред. И. А. Золоторя, Н. А. Пузакова, В. М. Сиденко. М.: Транспорт, 1971. 416 с.
12. Каримов Э. М. Учет влияния региональных природно-климатических условий на состояние дорожных конструкций территории Юго-Западной Киргизии // Вестник ВолГАСУ. 2023. № 1 (90). С. 81–92.
13. Киялбаев А. К., Алимгазин Б. Т., Адыгаппаров К. Примеры определения расчетной влажности грунта в теле земляного полотна в условиях засушливого климата // Вестник КГУСТА. 2016. № 1 (52). С. 21–26.
14. Афиногенов О. П., Ефименко С. В., Афиногенов А. О. Совершенствование методов проектирования автомобильных дорог на основе дифференциации районирования. Кемерово: Офсет, 2015. 364 с.
15. Каримов Э. М., Прогнозирование расчетной влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог при глубоком залегании уровня грунтовых вод на территории Юго-Западного Кыргызстана // Вестник ВолГАСУ. 2024. № 3 (96). С. 6–14.

Дата поступления: 21.10.2024

Решение о публикации: 20.11.2024

Контактная информация:

Э. М. КАРИМОВ — канд. техн. наук,
доцент, заведующий кафедрой «Прикладная механика» Ошского технологического университета им. М. М. Адышева; karimov.71@mail.ru

Forecasting of soil moisture of the roadbed of automobile roads in foothill and mountainous areas on the territory of Southwestern Kyrgyzstan

E. M. Karimov

Osh Technological University of Kyrgyzstan, 81, N. Isanov st., 723503, Osh, Republic of Kyrgyzstan

For citation: Karimov E. M. Forecasting soil moisture of the earthen floor of highways of foothill and mountainous areas in the territory of Southwestern Kyrgyzstan // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 846–855. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-846-855

Abstract

Purpose: to substantiate the prediction of the moisture content of the roadbed, taking into account the peculiarities of climatic conditions in the territory of southwestern Kyrgyzstan. Southwestern Kyrgyzstan (Southwestern Kyrgyzstan), one of the four climatic provinces of Kyrgyzstan. The main source of soil moisture is precipitation. Precipitation is very variable in time and space in the study area, and therefore the identification of their altitude dependencies in the mountains is a difficult task with an insufficient amount of initial data, which is directly affected by moisture accumulation of the roadbed. All engineering measures to regulate the water-thermal regime are based on limiting the water-thermal regime, as well as limiting the access of moisture to the roadbed, and proper planning of these measures is carried out only if the sources of humidification of the area are carefully established. **Methods:** forecasting the moisture content of the soil of the roadbed with a sufficient degree of reliability allows you to predict the spring or autumn moisture content of the soil of the roadbed using a mathematically justified analysis of weather and climatic factors of the foothill and mountainous zone. **Results:** the task of this work is to develop a methodology for predicting the moisture content of clay soils of the roadbed of the 1st type of terrain, taking into account the nature and degree of humidification of foothill and mountainous terrain for the territory of southwestern Kyrgyzstan. **Practical significance:** this technique is used in the design, as well as during the operation of the pavement on the territory of southwestern Kyrgyzstan with a sufficient degree of reliability to predict the spring or autumn moisture content of the soil of the roadbed using a mathematically based analysis of weather and climatic factors. An analysis of direct observations of soil humidity and temperature was carried out, during which it was shown that humidity and Selyaninov's hydrothermal coefficient (GTC) are related by a regression equation. As a result, equations were obtained for calculating the relative humidity of the soil in the foothill and mountainous road-climatic regions of southwestern Kyrgyzstan.

Keywords: relative soil humidity, water-thermal regime, road surface, atmospheric precipitation, Selyaninov hydrothermal coefficient (GTC)

References

1. Agroklimaticheskie resursy Oshskoj oblasti Kirgizskoj SSR. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 148 s. (In Russian)
2. Prikladnoe znachenie sputnikovoj modeli TMRA pri ustanovlenii normy godovogo kolichestva atmosferynyh osadkov po dorozhno-klimaticheskim zonam na territorii Yugo-Zapadnogo Kyrgyzstana / Efimenko V. N [i dr.] // Vestnik TGASU. 2021. No. 4. S. 144–158. (In Russian)
3. Ryskal' M.O. Ocenka summ osadkov na territorii Kyrgyzstana po dannym sputnikovyh nablyudenij: diss. ... kand. geogr. nauk. Bishkek, 2020. 173 s. (In Russian)
4. Ryskal' M.O. Sputnikovye karty godovyh i sezonnyh summ osadkov dlya territorii Kyrgyzstana // Materialy Mezhdunar. nauch. konf, posvyasch. 15-letiyu CAIIZ "Distancionnye i nazemnye issledovaniya zemli v Central'noj Azii". Bishkek, 2019. S. 206–213. (In Russian)

5. Karimov E.M. Opredelenie raschetnoj vlazhnosti gruntov v estestvennom zaleganii po eksperimental'nym dannym otnositel'no vysotnyh otmetok rel'efa Kyrgyzstana // Vestnik KRSU. 2022. T. 8. No. 12. S. 140–151. (In Russian)
6. Karimov E.M. Vliyanie vodno-teplovogo rezhima na tekhnicheskoe sostoyanie zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog v usloviyah V dorozhno-klimaticheskoy zony Kyrgyzstana // Vestnik TGASU. 2020. No. 1. S. 193–204. (In Russian)
7. Gnezdilova S.A. Prognozirovanie vlazhnosti gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog dlya celej proektirovaniya i ekspluatatsii na territorii Belgorodskoy oblasti // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2015. No. 5. S. 36–38. (In Russian)
8. Efimenko V.N. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog pri glubokom promerzanii gruntov (na primere yugo-vostoka Zapadnoj Sibiri): diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 1978. 216 s. (In Russian)
9. Ponomarenko P. N. Atmosfernye osadki Kirgizii. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 129 s. (In Russian)
10. Podrezov O.A. Gornaya klimatologiya i vysotnaya klimaticheskaya zonal'nost' Kyrgyzstana. Bishkek, 2014. 169 s. (In Russian)
11. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i dorozhnyh odezhd / pod. red. I.A. Zolotorya, N.A. Puzakova, V.M. Sidenko. M.: Transport, 1971. 416 s. (In Russian)
12. Karimov E.M. Uchet vliyaniya regional'nyh prirodno-klimaticheskikh uslovij na sostoyanie dorozhnyh konstrukcij territorii Yugo-Zapadnoj Kirgizii // Vestnik VolGASU. 2023. No. 1 (90). S. 81–92. (In Russian)
13. Kiyalbaev A. K., Alimgazin B. T., Adygapparov K. Primery opredeleniya raschetnoj vlazhnosti grunta v tele zemlyanogo polotna v usloviyah zasushlivogo klimata // Vestnik KGUSTA. 2016. No. 1 (52). S. 21–26. (In Russian)
14. Afinogenov O.P., Efimenko S.V., Afinogenov A.O. Sovershenstvovanie metodov proektirovaniya avtomobil'nyh dorog na osnove differentsiatsii rajonirovaniya. Kemerovo: Ofset, 2015. 364 s. (In Russian)
15. Karimov E.M., Prognozirovanie raschetnoj vlazhnosti gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog pri glubokom zaleganii urovnya gruntovykh vod na territorii yugo-zapadnogo Kyrgyzstana // Vestnik VolGASU. 2024. No. 3 (96). S. 6–14. (In Russian)

Received: 21.10.2024

Accepted: 20.11.2024

Author's information:

E.M. KARIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mechanics in M. M. Adyshev Osh Technological University; karimov.71@mail.ru

УДК 656.27

Перераспределение транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий: постановка задачи и генетические алгоритмы

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

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

Для цитирования: Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Перераспределение транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий: постановка задачи и генетические алгоритмы // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 856–865. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-856-865

Аннотация

Цель: повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной сети с использованием провозной способности транзитных малоинтенсивных железнодорожных линий. **Методы:** применены методы теории управления, теория транспортных процессов, системного анализа, синтеза и генетических алгоритмов. **Результаты:** усовершенствован инструментарий перераспределения транспортных потоков между малоинтенсивными линиями и линиями других категорий с использованием генетических алгоритмов. **Практическая значимость:** предлагаемый инструментарий позволяет определить приоритет пропуска грузовых поездов между железнодорожными линиями различных категорий, включая малоинтенсивные, для снижения задержек в продвижении грузопотоков.

Ключевые слова: малоинтенсивные железнодорожные линии, генетические алгоритмы, транспортная сеть, логистика, перераспределение транспортных потоков

Введение

На железнодорожной транспортной сети особое место занимает проблема задержки в продвижении транспортных потоков по различным причинам, в связи с чем их перераспределение между железнодорожными линиями различных категорий, включая малоинтенсивные линии (МИЛ), является актуальным. Это позволяет повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной сети [1–3], способствует повышению пропускной и провозной способности, увеличению экономической эффективности за счет роста доходов от перевозок по МИЛ, повышению класса и категории линии.

Малоинтенсивные линии обслуживают, как правило, отдаленные регионы с низкой транспортной доступностью. Увеличение на них транспортного потока может способствовать экономическому развитию регионов, улучшая доступность и привлекая инвестиции [4–6].

Перераспределение потоков позволяет эффективно регулировать загруженность железнодорожной транспортной сети в интеграции с другими видами транспорта, совершенствуя логистический процесс доставки грузов. Необходимость перераспределения транспортных потоков между МИЛ и линиями других категорий в условиях высокой неравномерности

грузопотоков и загруженности отдельных направлений при низкой загруженности прилегающих параллельных линий обусловлена стремлением к оптимизации перевозочного процесса.

Постановка задачи перераспределения транспортных потоков между МИЛ и линиями других категорий

Пусть $L = L_1, L_2, \dots, L_n$ — множество железнодорожных линий, где L_i — i -я линия. $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ — множество поездов, где P_j — j -й поезд. Требуется организовать продвижение транспортного потока с использованием имеющейся инфраструктуры МИЛ.

При этом $x_{ij}(t)$ — бинарная переменная, равная 1, если поезд P_j находится на линии в момент времени t , и 0 в противном случае; d_{ij} — время движения поезда P_j по линии L_i ; c_i — пропускная способность линии L_i (максимальное количество поездов, которое может находиться на линии в единицу времени); ω_j — приоритет поезда P_j ; $s_i(t)$ — состояние линии L_i в момент времени t .

Целевая функция состоит в минимизации суммарного времени задержек продвижения грузопотоков и оптимальном продвижении транспортных потоков:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_{ij} \cdot x_{ij}(t) \cdot (1 - \frac{\omega_j}{W})), \quad (1)$$

где W — суммарный приоритет всех поездов;

n — количество поездов;

m — количество линий или маршрутов;

d_{ij} — задержка поезда i на линии j ;

x_{ij} — бинарная переменная;

w_j — приоритет поезда j ;

W — суммарный приоритет всех поездов,

то есть $W = \sum_{j=1}^m w_j$.

В выражении (1) d_{ij} представляет собой величину задержки поезда i на линии j . Бинарная переменная $x_{ij}(t)$ характеризует, находится ли поезд i на линии j в момент времени t : если поезд i находится на линии j в это время, переменная принимает значение 1, если нет — 0.

Для минимизации целевой функции задержки всех категорий поездов, особенно для составов с более высоким приоритетом, характеризуются формулой $1 - \frac{\omega_j}{W}$, в которой

$\frac{\omega_j}{W}$ представляет долю приоритета поезда j от суммарного приоритета всех поездов W , позволяющего уменьшить влияние задержки для поездов с более высоким приоритетом.

Пропускная способность каждой линии не превышает $\sum_{j=1}^m x_{ij}(t) \leq c_i, \forall i, t$. Поезд движется только по одной линии в каждый момент времени $\sum_{i=1}^n x_{ij}(t) \leq 1, \forall j, t$, которая представлена в виде бинарной неопределенности. Взаимодействие МИЛ и линий других категорий осуществляется при невозможности пропуска по другим линиям: $x_{ij}(t) \cdot s_i(t) \leq k, \forall i, j, t$, где k — коэффициент, определяющий допустимую нагрузку на линию.

Предложено решение этой задачи с использованием метода генетических алгоритмов оптимизации и поиска оптимального решения [7, 8].

Блок-схема процедуры перераспределения транспортных потоков на железнодорожной транспортной сети представлена на рис. 1. Предлагаемая блок-схема может быть интегрирована с действующими автоматизированными системами суточного клиентского плана погрузки (СКПП) или динамической моделью загрузки инфраструктуры (ДМЗИ). Предлагаемая структура использования генетического алгоритма для оптимизации управления железнодорожными линиями позволяет

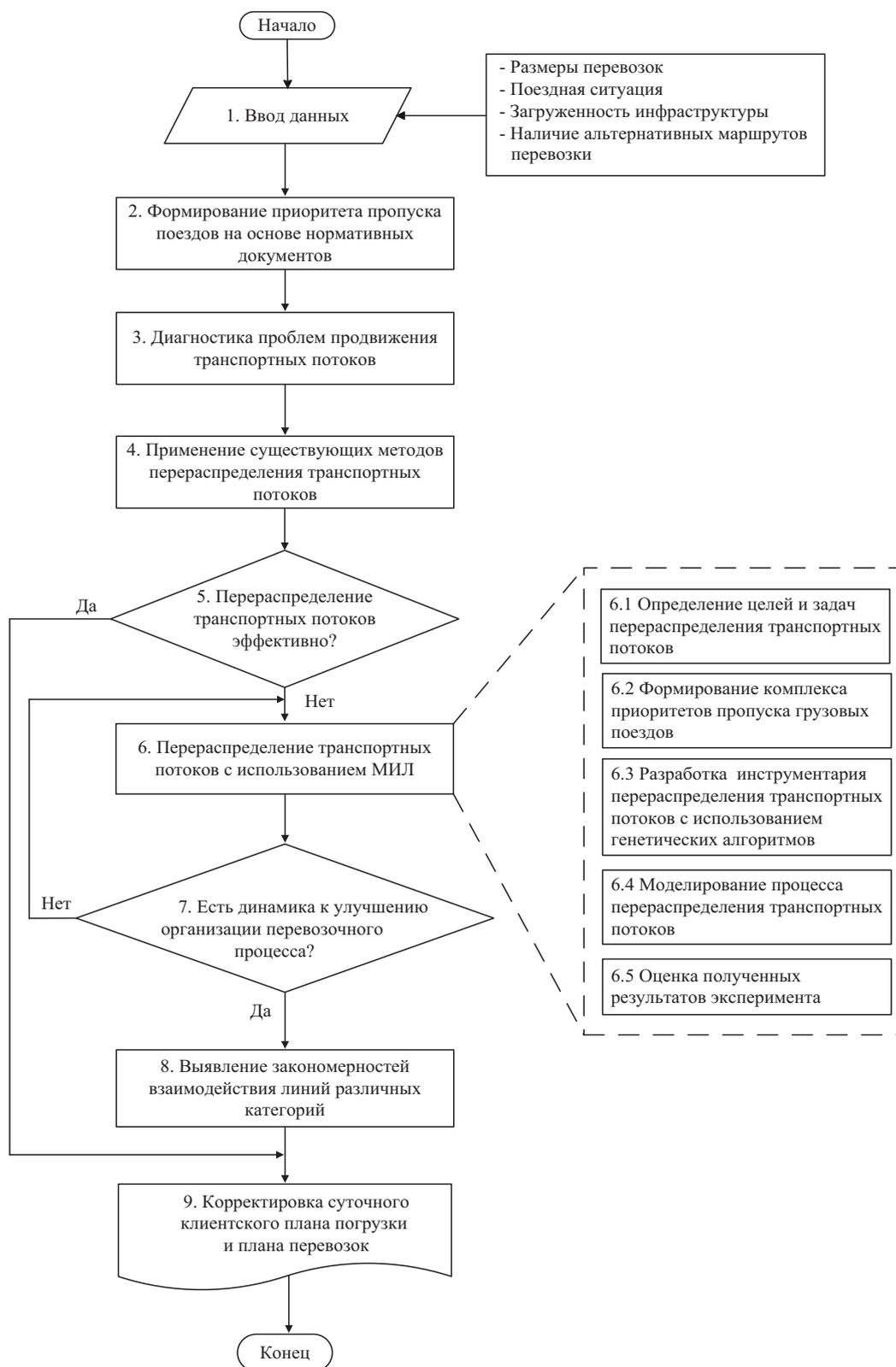


Рис. 1. Блок-схема процедуры перераспределения транспортных потоков на железнодорожной транспортной сети

снизить время задержки продвижения грузопотока.

На первом этапе реализуется ввод данных о размерах перевозок, поездной ситуации, загруженности инфраструктуры и наличии альтернативных маршрутов перевозок. Далее формируется приоритетность пропуска поездов в соответствии с нормативными документами, и диагностируются проблемы в продвижении грузопотоков. После этого применяются существующие методы перераспределения транспортных потоков, включая изменение плана формирования поездов и оперативные приказы по перевозкам кружностью (44 %) и объединению назначения (56 %). Если существующие методы эффективны, то на их основе формируется мониторинг перевозочного процесса. Если неэффективны, то реализуется перераспределение транспортных потоков с использованием МИЛ, которое включает в себя определение целей и задач, формирование комплекса приоритетов пропуска грузовых поездов, разработку инструментария для их реализации с использованием генетических алгоритмов, моделирование и оценку полученных результатов.

Имеется набор грузовых поездов различных категорий, отправляемых в одном направлении с возможностью использования альтернативных маршрутов. Осуществляется отбор приоритета пропуска поездов в соответствии с нормативными документами [9]. В случае затруднений в продвижении грузопотоков, высокой загруженности отдельных линий с учетом внешних возмущающих воздействий формируются новое решение и план перераспределения транспортных потоков. При положительной динамике в организации перевозочного процесса реализуется предлагаемый план.

Приоритетность пропуска поездов в модели разработана в соответствии с [9] в за-

висимости от следующей очередности перевозок:

- 1) восстановительные и пожарные поезда;
- 2) высокоскоростные, скоростные, скорые пассажирские поезда в дальнем следовании;
- 3) пригородное сообщение;
- 4) почтово-багажные, грузобагажные поезда;
- 5) специальные поезда;
- 6) грузо-пассажирские и людские поезда;
- 7) грузовые поезда (сквозные, участковые, сборные, вывозные, передаточные), хозяйственные поезда и локомотивы без вагонов.

Реализация перераспределения транспортных потоков между МИЛ и линиями других категорий

Решение рассмотрим на примере (рис. 2). Пусть имеется железнодорожная станция, к которой в одном направлении примыкают линии L_1 , пропускная способность которой составляет $c_1 = 36$ пар поездов в сутки, и L_2 (МИЛ), пропускная способность — $c_2 = 8$ пар поездов в сутки.

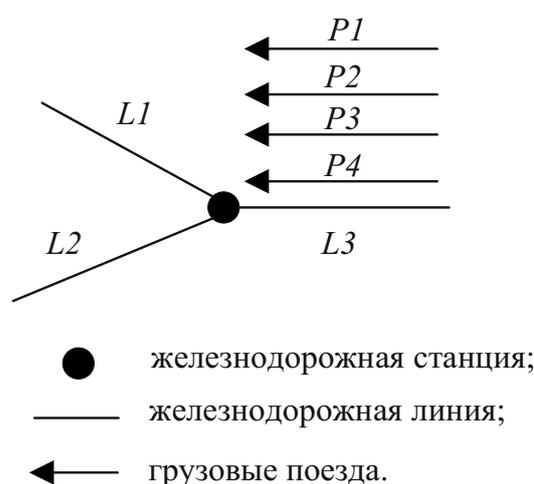


Рис. 2. Задача гибкого перераспределения транспортного потока между железнодорожными линиями различных категорий

Имеется необходимость в перераспределении транспортных потоков грузовых поездов следующих видов: участковый поезд P_1 ; передаточный поезд P_2 ; сквозной поезд P_3 ; вывозной поезд P_4 . Приоритет пропуска поездов в соответствии с [9] составит: для P_1 — $\omega_1 = 1$; для P_2 — $\omega_2 = 2$; для P_3 — $\omega_3 = 3$; для P_4 — $\omega_4 = 4$. Время движения по линиям в минутах составит: $d_{1,1} = 45$; $d_{1,2} = 53$; $d_{1,3} = 63$; $d_{1,4} = 84$; $d_{2,1} = 55$; $d_{2,2} = 66$; $d_{2,3} = 78$; $d_{2,4} = 106$.

Целевая функция в соответствии с выражением (1) имеет вид:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_{ij} \cdot x_{ij}(t) \cdot (1 - \frac{\omega_j}{10})).$$

Разработан программный код на языке Python, для проведения модельных экспериментов фрагмент кода представлен на рис. 3.

Проведен комплекс модельных экспериментов и представлены наиболее значимые результаты моделирования (табл. 1). Вариант 1 характеризует существующий перевозочный процесс без перераспределения транспортных потоков с приоритетом вывозных поездов. Ва-

риант 2 — умеренный вариант, включающий изменение в перераспределении транспортных потоков и повышение приоритета передаточным и сквозным поездам. Вариант 3 характеризует рациональное перераспределение с приоритетом для участковых и вывозных поездов. Вариант 4 — перераспределение на МИЛ с приоритетом для передаточных поездов.

Показатель «фитнес-функция» характеризует эффективность принимаемого решения по распределению грузовых поездов по линиям L_1, L_2 и позволяет ранжировать решения по их качеству. Решения с максимальным значением фитнес-функции определяют направление поиска оптимального решения на качественном уровне. При этом вариант 1 (без распределения) имеет наименьшее значение по этому показателю, что свидетельствует о необходимости поиска вариантов перераспределения транспортных потоков.

Наименьшее значение меры устойчивости — в варианте 1, остальные варианты имеют большую степень устойчивости. Лучшие

```

37     for j in range(num_trains):
38         if individual[i, j] == 1:
39             fitness += times[i, j] * (1 - priorities[j] / 6)
40     return fitness
41
42 def selection(population):
43     selected = []
44     for _ in range(pop_size):
45         i, j = random.sample(range(pop_size), 2)
46         if fitness_function(population[i]) < fitness_function(population[j]):
47             selected.append(population[i])
48         else:
49             selected.append(population[j])
50     return selected
51
52 def crossover(parent1, parent2):
53     if random.random() < crossover_rate:
54         point = random.randint(1, num_trains - 1)
55         child1 = np.concatenate((parent1[:, :point], parent2[:, point:]), axis=1)
56         child2 = np.concatenate((parent2[:, :point], parent1[:, point:]), axis=1)
57         return child1, child2
58     return parent1, parent2

```

Рис. 3. Фрагмент программного кода на языке Python

ТАБЛИЦА 1. Результаты моделирования

Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Приоритет поездов	1, 2, 3, 4	1, 2, 2, 1	4, 3, 2, 4	1, 2, 1, 1
Лучшее решение	[1, 1, 1, 1] [0, 0, 0, 0]	[1, 1, 0, 1] [0, 0, 1, 0]	[1, 0, 1, 1] [0, 1, 0, 0]	[1, 0, 0, 1] [0, 1, 1, 0]
Степень эффективности (фитнес-функция)	13,72	184,83	187,46	195,3
Мера устойчивости к внешним возмущающим воздействиям (мутация)	0,38	0,59	0,59	0,59
Степень вариантности принимаемого решения (кроссовер)	0,98	1,0	1,0	1,0

значения степени вариантности принимаемого решения — у вариантов 2–4.

В варианте 1 (без перераспределения транспортных потоков) поезда следуют по линии L_1 , это характеризует лучшее решение [1, 1, 1, 1]. В варианте 2 (частичное перераспределение на малоинтенсивные линии) возможен пропуск сквозного грузового поезда по линии L_2 . В варианте 3 реализован пропуск передаточного грузового поезда по линии L_2 . В варианте 4 — пропуск передаточного и сквозного грузового поезда по линии L_2 .

В результате моделирования установлено, что возможно перераспределение грузовых поездов между МИЛ и линиями других категорий для передаточных и сквозных грузовых поездов.

По представленным вариантам разработаны графики значения функции приспособленности по поколениям (рис. 4) и гистограммы распределения загрузки линий (рис. 5).

График функции приспособленности по поколениям характеризует значения процесса поиска оптимального решения с использованием генетического алгоритма.

Вариант 1. Тенденция минимального значения фитнес-функции характеризует улучшение процесса поиска оптимального реше-

ния при проводимом эксперименте. Среднее значение фитнес-функции имеет нисходящий тренд, что свидетельствует о диверсификации получаемых результатов. Максимальное значение фитнес-функции имеет скачкообразный вид, свидетельствующий о возможности нахождения новых, оптимальных решений, при этом алгоритм успешно поддерживает вариативность принимаемых решений.

Вариант 2. Минимальное значение функции имеет тенденцию к снижению, что указывает на улучшение общего качества принимаемого решения. Среднее значение плавно снижается. Максимальное значение функции плавно снижается, что уменьшает возможность нахождения новых вариантов перераспределения транспортных потоков.

Вариант 3. Минимальное значение функции имеет тенденцию к снижению. Среднее значение фитнес-функции плавно снижается и приближается к минимальному значению вариантности маршрутов. Максимальное значение функции имеет скачкообразный вид, что характеризует поиск оптимальных вариантов перераспределения транспортных потоков.

Вариант 4. Минимальное значение функции на начальном этапе имеет самое высокое значение в рассматриваемых вариантах

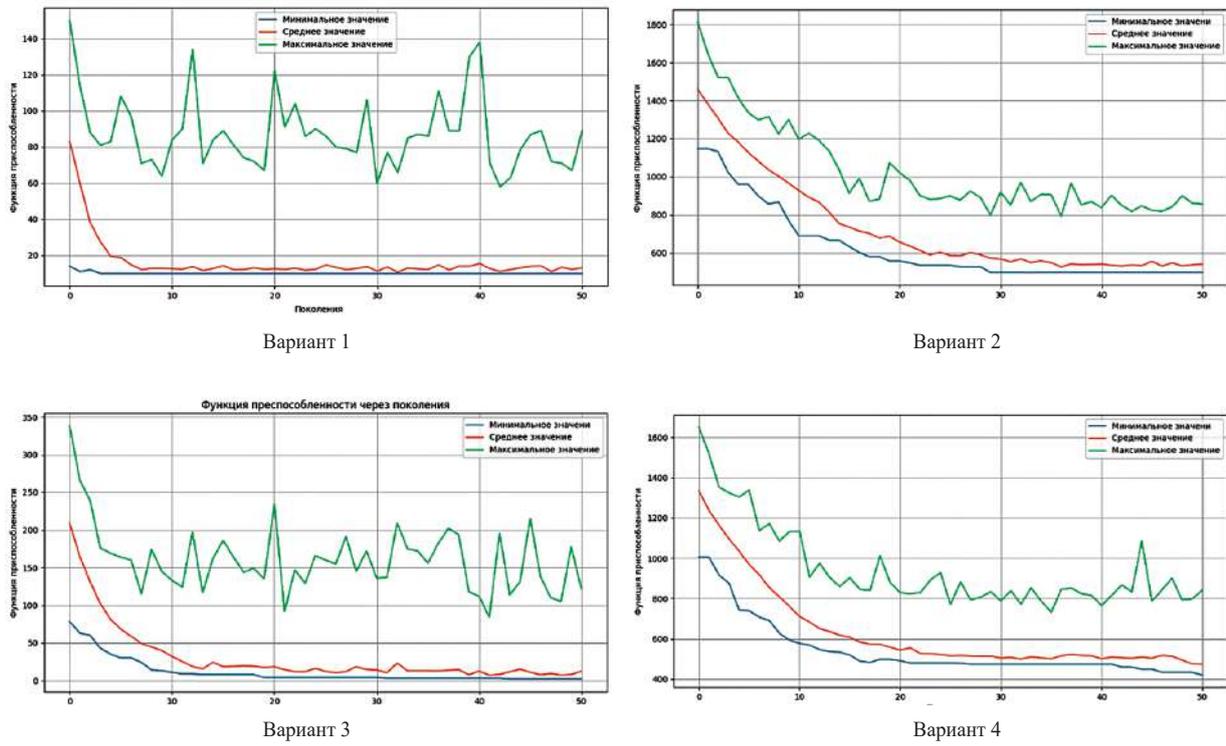


Рис. 4. Функции приспособленности по поколениям

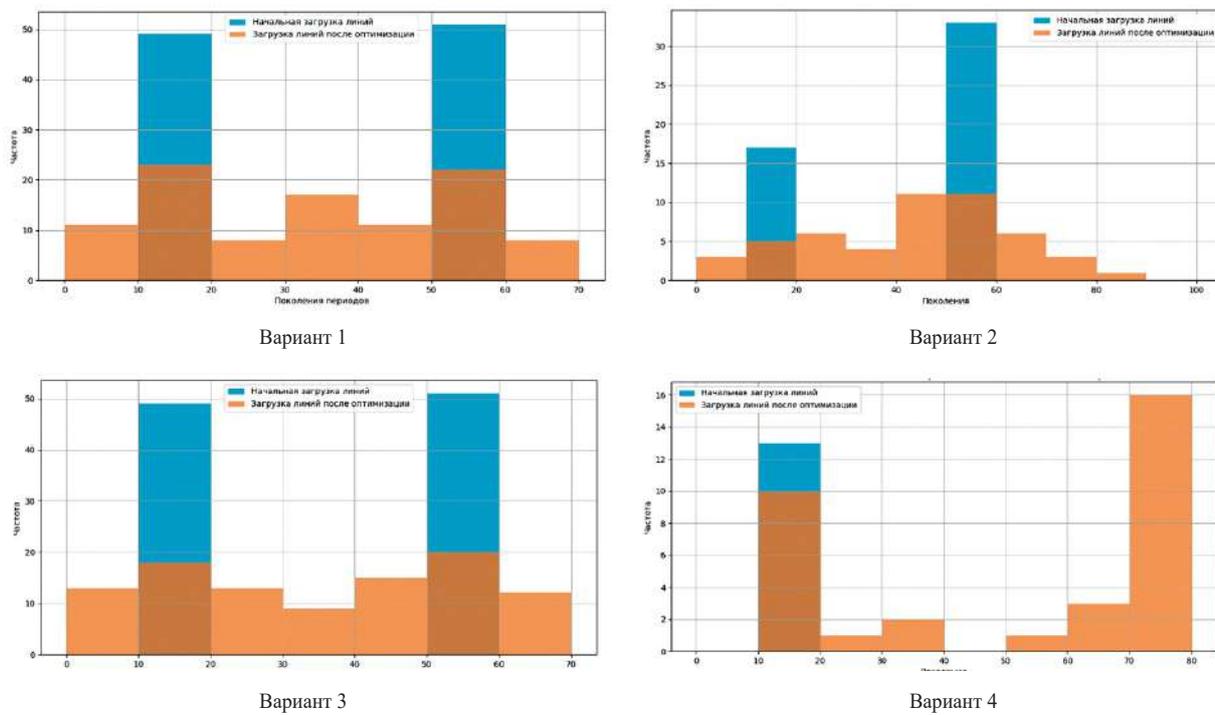


Рис. 5. Гистограммы распределения загрузки линий

и имеет тенденцию к снижению. Среднее значение функции плавно снижается и приближается к минимальному значению вариантности маршрутов. Максимальное значение функции имеет незначительные колебания для вариантности перераспределения транспортных потоков.

Гистограммы распределения характеризуют начальные и оптимизированные значения загрузки линий, определенные с использованием генетического алгоритма, что показывает эффективность применяемого инструментария по оптимизации распределения транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий.

Вариант 1 имеет высокую загруженность отдельных линий на различных этапах моделирования. Вариант 2 при наличии альтернативных маршрутов снижает частоту загрузки линий с 50 до 35. Вариант 3 имеет равномерную загруженность линий при высокой начальной загруженности отдельных направлений. Вариант 4 характеризует высокую степень перераспределения транспортных потоков и высокую степень загруженности на последних тактах моделирования.

Анализ полученных результатов моделирования позволяет лицу, принимающему решения, иметь полную информацию о возможных вариантах перераспределения транспортных потоков с использованием инфраструктуры МИЛ.

В результате анализа проведенного комплекса экспериментов выявлен ряд закономерностей:

1. Перераспределение грузовых поездов целесообразно применять для минимизации задержек в продвижении грузопотоков, которые трудно учесть при планировании перевозочного процесса.

2. Транзитные МИЛ могут быть использованы для продвижения грузопотоков, имеющих

запас по сроку доставки груза, с предоставлением системы скидок клиентам, что позволит повысить эффективность использования пропускной способности транспортной сети.

3. Снизить критические, максимальные значения потребной пропускной способности для отдельных линий возможно за счет использования транзитных МИЛ.

4. Адаптивность железнодорожной транспортной системы к высокой неравномерности транспортных потоков позволяет перераспределять их в зависимости от внешних и внутренних возмущающих воздействий, к которым относятся задержки в продвижении грузопотоков, нестандартные ситуации и изменение спроса на перевозки.

Заключение

Рассмотрена задача перераспределения транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий с применением генетических алгоритмов для эффективного использования существующей железнодорожной инфраструктуры.

Применение генетических алгоритмов позволяет улучшить распределение грузовых поездов по линиям за счет оптимизации целевой функции, учитывающей приоритеты поездов и пропускную способность железнодорожных линий. Представлена программная реализация на языке Python и графическая интерпретация модельных экспериментов.

В модели учитываются приоритеты грузовых поездов на основании действующих нормативных документов, что позволяет минимизировать задержки для составов, имеющих высокий приоритет. Предложенное решение задачи применимо в реальных условиях для перераспределения транспортных потоков при наличии альтернативных маршрутов продвижения груза по МИЛ и линиям других категорий.

Библиографический список

1. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий: монография / С. П. Вакуленко [и др.]; под ред. С. П. Вакуленко. М.: ВИНТИ РАН, 2018. 218 с.

2. Шарапов С. Н., Лялько М. В. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60.

3. Ковалев К. Е., Новичихин А. В., Медведь О. А. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 2. С. 150–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161

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

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

6. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008

7. Evolutionary Computation: The Fossil Record / ed. D. B. Fogel. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998.

8. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.

9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. М.: ИНФРА-М, 2022. 561 с.

Дата поступления: 04.10.2024

Решение о публикации: 08.11.2024

Контактная информация:

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

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — докт. техн. наук, доцент; novichihin@bk.ru

Redistribution of traffic flows between railway lines of different categories: problem statement and genetic algorithms

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

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

For citation: Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Redistribution of traffic flows between railway lines of different categories: problem statement and genetic algorithms // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 856–865. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-856-865

Abstract

Purpose: to improve the efficiency of the railway transport network using the carrying capacity of low-intensity transit railway lines. **Methods:** methods of control theory, transport process theory, system

analysis, synthesis and genetic algorithms were applied. Results: The toolkit for redistributing traffic flows between low-intensity lines and lines of other categories using genetic algorithms was improved. **Practical significance:** the proposed toolkit allows determining the priority of passing freight trains between railway lines of different categories, including low-intensity ones, in order to reduce delays in the movement of freight flows.

Keywords: low-intensity railway lines, genetic algorithms, transport network, logistics, redistribution of traffic flows

References

1. Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy: monografiya / S. P. Vakulenko [i dr.]; pod red. S. P. Vakulenko. M.: VINITI RAN, 2018. 218 s. (In Russian)
2. Sharapov S. N., Lyal'ko M. V. Klassifikatsiya i spetsializatsiya zheleznodorozhnykh liniy — osnova optimizatsii ekspluatatsionnykh raskhodov // Zheleznodorozhnyy transport. 2016. No. 7. S. 50–60. (In Russian)
3. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Medved' O. A. Razrabotka mekhanizmov povysheniya effektivnosti funkcionirovaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy // Avtomatika na transporte. 2022. T. 8. No. 2. S. 150–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161 (In Russian)
4. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podhod k upravleniyu processami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyah // Avtomatika na transporte. 2021. T. 7. No. 2. S. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267 (In Russian)
5. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. T. 402 LNNS. S. 701–709. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76
6. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008
7. Evolutionary Computation: The Fossil Record / ed. D. B. Fogel. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998.
8. Emel'yanov V. V., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. Teoriya i praktika evolyucionnogo modelirovaniya. M.: Fizmatlit, 2003. 432 s. (In Russian)
9. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossijskoj Federatsii: utv. prikazom Mintransa Rossii ot 23.06.2022 No. 250. M.: INFRA-M, 2022. 561 s. (In Russian)

Received: 04.10.2024

Accepted: 08.11.2024

Author's information:

Konstantin E. KOVALEV – PhD in Engineering;
kovalev@pgups.ru

Alexey V. NOVICHIKHIN – Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor; novichikhin@bk.ru

УДК 629.4.015

Совершенствование системы расследования аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте

Л. В. Мартыненко¹, Д. П. Кононов²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

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

Для цитирования: Мартыненко Л. В., Кононов Д. П. Совершенствование системы расследования аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 866–873. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-866-873

Аннотация

Цель: повышение безопасности движения железнодорожного подвижного состава в кривых и на горно-перевальных участках пути. **Методы:** приведены методы расследования аварийных ситуаций при перевозке железнодорожных грузов, а также основные характеристики, влияющие на подвижной состав. Существенную роль в обеспечении безопасности движения играет выявление причин аварийных ситуаций, которые основываются на данных, полученных при обследовании участков с помощью специальных лабораторий. После получения данных проводится соответствующий анализ системы «локомотив — вагон — путь» в каждом классе этой системы и рассчитывается отношение отклонений в этих классах к факту схода вагона или другим аварийным ситуациям. **Результаты:** при обследовании места происшествия экспертная комиссия по расследованию должна установить факт схода и выполнить несколько задач: исследование повреждений вагона и пути, степень данных повреждений, анализ нарушений правил эксплуатации, изучение стандартных изломов и т. д. Для определения данного схода необходимо собрать большую статистическую базу и разделить ее на основные отклонения по разным классам всей системы «локомотив — вагон — путь». **Практическая значимость:** существенное значение для обеспечения безопасности движения приобретают расчетно-эмпирическая оценка и классификация опасности различных отклонений характеристик состояния системы, а также разработка математических моделей указанных процессов и ситуаций. Это позволяет повысить точность определения степени причастности вагона к возникновению аварийной ситуации в кривых и на горно-перевальных участках.

Ключевые слова: безопасность движения, аварийные ситуации, система «локомотив — вагон — путь», горно-перевальные участки

Введение

В настоящее время недостаточно полно учитывается влияние нарушений скоростного режима [1–4]. В результате возникают аварийные ситуации, причиной которых является режим ведения локомотива. При рассмотрении скоростемерной ленты выявлен ряд факторов,

которые могли повлечь за собой не только нарушение режима движения, но и увеличение продольных сил в автосцепном устройстве при рывках или разных случаях торможения.

Так как автосцепное устройство отвечает за сжимающие и растягивающие силы, то

техническое состояние данного узла должно содержаться в пределах нормы, иначе может пострадать весь состав или отдельно взятые вагоны. Степень причастности локомотива рассматривается только в скоростном режиме [5]. Но скорость — это один из факторов. За ним идет динамика движения, которая появляется при взаимодействии вагона и пути. В результате в процессе эксплуатации могут не только развиваться различные отклонения в параметрах вагона и пути, но и появиться такие силы, которые увеличивают износ деталей и узлов и, соответственно, процент аварийных ситуаций [6–8]. Поэтому на сегодняшний день актуально решать проблему в целом, а рассмотрение отдельных проблем, связанных с эксплуатацией, объединить в одно целое, то есть в одну систему, но при этом создать разные классы и их параметры для набора статистических данных и дальнейшего анализа на основе собранного материала [9]. Данная методика поможет определить причастность каждого параметра нескольких классов и, соответственно, определить причастность класса и параметров данного класса к сходу.

Методика определения аварийных ситуаций

Расследованиями сходов подвижного состава в грузовых поездах занимается Ситуационный центр мониторинга и управления чрезвычайными ситуациями ОАО «РЖД» (ЦЧС). Контрольные сведения для расследований чрезвычайных ситуаций предоставляются организациями по обеспечению данных объектов, а конкретно тремя службами: пути и зданий для «содержания и охранения» железнодорожного пути, подвижного состава и тяги, движения или эксплуатации.

Эти службы предоставляют полную информацию по объектам для оценки причастности

к аварийной ситуации. Объектами данной системы являются вагон, локомотив и путь, поэтому в основе расследований сходов используется методика, которая учитывает очевидные отказы элементов технических систем (излом, сдвиги и т. д.), и результаты экспертиз могут носить односторонний характер [10]. Сходы всегда относят к определенной службе, соответственно, к определенному объекту, поэтому окончательное заключение по сходам является некорректным, так как не рассматривается взаимосвязь этих объектов между собой. Предложенное совершенствование методов расследований заключается не только в выявлении причастности одного из рассматриваемых объектов, но и в определении степени отношения каждого объекта к аварийной ситуации. В расследованиях аварийных ситуаций необходимо рассмотреть полностью систему «локомотив — вагон — путь», так как подразделения, которые имеют отношение к данному событию, отвечают за нарушения или отклонения в процессе эксплуатации.

В настоящее время увеличение количества сходов (рис. 1) показывает, что действующие методы расследования не решают проблему, а только определяют причастность определенной службы к аварийной ситуации. Данная статистика подтверждает, что требуется внедрение новых технологий, которые смогут не только повысить качество расследования, но и в будущем решить проблему по повышению безопасного ведения подвижного состава на сложных участках пути.

Во многих случаях, когда расследуют тот или иной сход, не могут найти явных отказов или отклонений [11]. Тогда экспертное заключение основывается на обычном нарушении правил эксплуатации, которое на самом деле имеет минимальное значение в сходе и не может привести к аварийным ситуациям. Эти

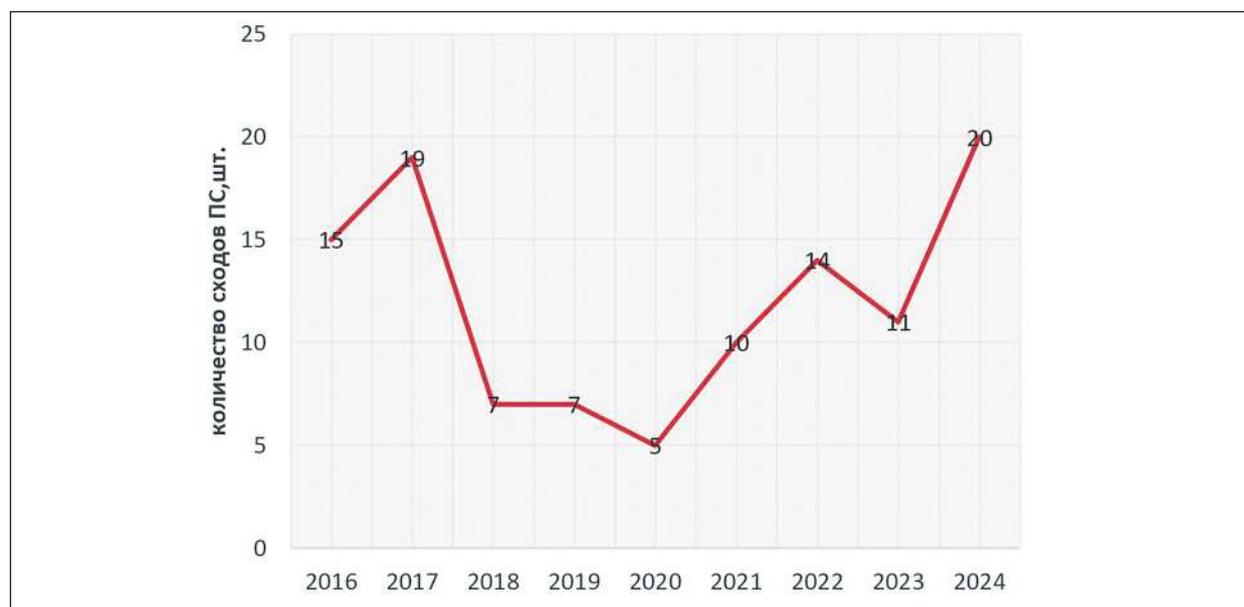


Рис. 1. Количество сходов за 2016–2024 годы

заклучения очень часто приводят к повторным событиям, повлекшим за собой аварийные ситуации или сходы подвижного состава. В связи с этим предлагается рассматривать сочетание неисправностей одной группы причин с другой. Данное сочетание является особым видом отказов, при которых должны выполняться определенные нормы при ведении подвижного состава, так как любая неисправность представляет собой изменение скоростей и выделение опасных участков при их прохождении, а также техническое состояние всей системы. Система включает в себя те объекты, по причине отклонений в которых происходит сход подвижного состава. Объектами сложной системы являются «локомотив», «вагон», «путь» и, соответственно, техническое состояние узлов и деталей, которые по отдельности могут работать в штатном режиме, а в сочетании представлять особую опасность как для подвижного состава в целом, так и для окружающей среды и жизни людей [12, 13]. Совершенствование методики также включает в себя разделение видов технической составляющей на классы.

Методы исследования

При исследовании аварийных ситуаций параметры подвижного состава и пути обозначаются p_n^k . Степени причастности к каждому сходу и классу схода определяются числовыми значениями и имеют относительные меры, определяющие степень расположения объектов по значимости к аварийной ситуации [14]. Также учитывается ядро класса, то есть то значение, которое показывает максимальное значение параметров в эксплуатации, и при выходе за эти значения наступает аварийная ситуация.

В предлагаемой методике определения причин схода используется алгоритм оценки состояния каждого класса отдельно и в сочетании между собой, что позволяет существенно уточнить результаты расследования, а также выявить различные неисправности, сочетания которых являются наиболее опасными при движении на горно-перевальных участках.

В соответствии с используемой методикой относительная мера близости d движущегося подвижного состава к аварийному состоянию

определяется для каждого класса причин равенством:

$$d(C_i, K_j) = \sqrt{\left[\sum_1^{m_j} (p_n - k_n)^2 / k_n^2 \right] / m_j}, \quad (1)$$

где C_i — рассматриваемый сход;

K_j — классы причин схода (K_1 — класс причин, определяемых состоянием пути, K_2 — класс причин, определяемых состоянием вагона, K_3 — класс причин, определяемый отклонениями режима движения локомотива);

p_n — значения параметров состояния элементов класса;

k_n — критическое (предаварийное) значение параметра состояния;

m_j — число параметров в каждом из введенных классов причин;

n — число параметров рассматриваемого класса схода.

Существенными элементами подхода, направленного на выяснение причин сходов, являются соотношения, определяющие доли участия каждого класса причин на процесс схода [15, 16]. Практический интерес представляет также оценка опасности сочетания отдельных отклонений качественно различного типа.

В процессе анализа причин схода для каждого из рассматриваемых классов определяются характеристики, показывающие степень причастности того или иного класса к сходу — q_n, q_6, q_l :

$$\begin{aligned} q_n &= \frac{d_l d_6}{d_n d_6 + d_n d_l + d_6 d_l}, \\ q_6 &= \frac{d_n d_l}{d_n d_6 + d_n d_l + d_6 d_l}, \\ q_l &= \frac{d_n d_6}{d_n d_6 + d_n d_l + d_6 d_l}. \end{aligned} \quad (2)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка с указанных позиций результатов расследования аварийных ситуаций на ВСЖД в 2016–2024 годах показала, что наиболее опасными участками являются те, которые имеют отклонения не только в численных значениях, но и в тех параметрах, которые влияют на вхождение локомотива в данный участок, особенно если он является переходным, так как большинство сходов происходит на первых метрах переходных кривых. Такое сочетание необходимо учитывать при разработке ограничений скоростного режима движения на горно-перевальных участках пути.

Для оценки степени опасности различных отклонений было осуществлено их ранжирование в соответствии с результатами оценки выявленных отклонений [17, 18]. Результаты показывают, что ранжирование коррелирует с линейным ростом отклонений от нормативных значений, что указывает на эффективность оценки опасности выявленных отклонений на основе анализа рассматриваемых норм близости.

На рис. 2 представлен график зависимости мер близости от степени опасности (нумерации ранжирования) выявленных отклонений. Для оценки степени опасности различных отклонений было осуществлено их ранжирование в соответствии с результатами оценки выявленных отклонений.

Соотношение (2) представляет собой математическую модель, которая определяет степень причастности классов к сходу. Анализ аварийных ситуаций рассчитывался с помощью данных формул. Также были рассчитаны параметры, повлиявшие на сход, — непогашенное ускорение, которое меняется в большую сторону из-за отклонений в пути, а конкретно — несоответствие возвышения наружного рельса

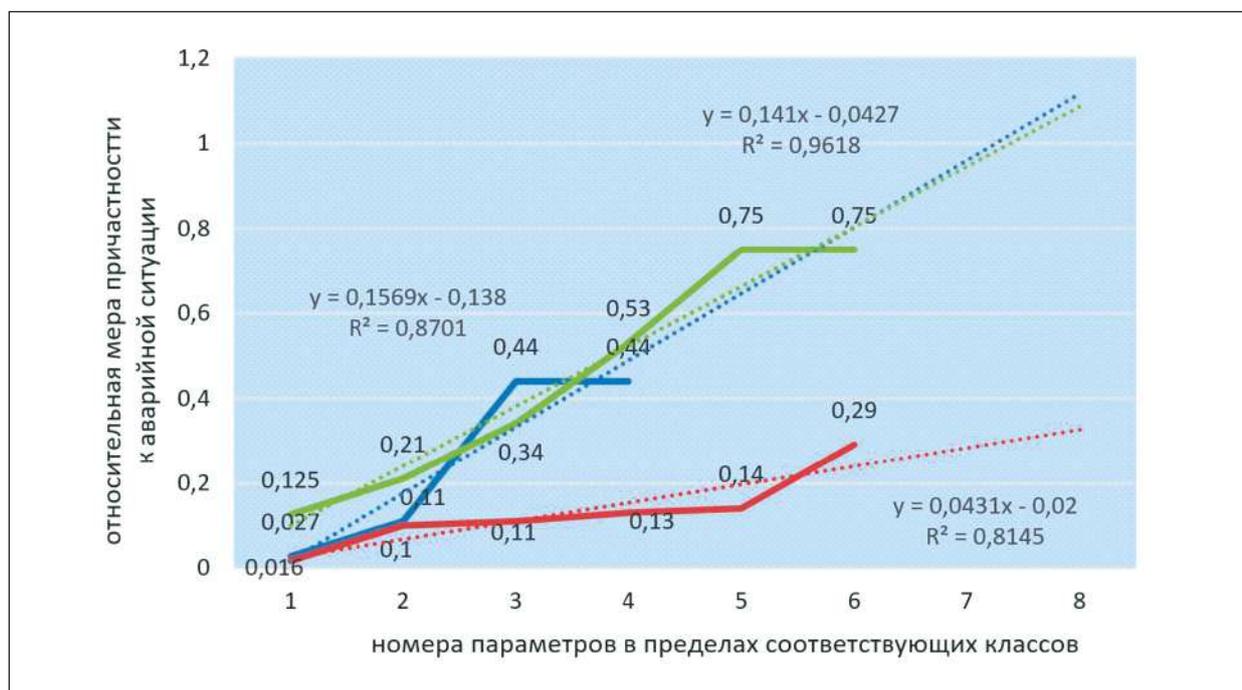


Рис. 2. Расчетно-эмпирические данные об отклонениях параметров в различных классах причин схода

над внутренним и малые длины переходных участков малого радиуса.

Заключение

Полученные результаты исследования возникновения аварийных ситуаций показали, что основные причины заложены внутри системы «локомотив — вагон — путь» и связаны не только с отклонениями, но и с взаимодействием этих данных внутри класса и всей системы в целом. Для повышения безопасности рассмотрены рекомендации по созданию контроля подвижного состава в процессе эксплуатации.

Библиографический список

1. Рудановский В.М. Методика определения причин сходов подвижного состава в условиях неопределенностей // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 10–15.

2. Грачева Л.О., Певзнер В.О., Анисимов П.С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. Вып. 549. М.: Транспорт, 1976. С. 4–25.

3. Ромен Ю.С., Николаев В.Е. Исследование влияния детерминированных неровностей пути в плане на уровень боковых сил при движении грузового вагона // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Киев: Наукова думка, 1980. С. 40–42.

4. Мельниченко О.В. Протокол эксплуатационных тягово-энергетических испытаний электроваза переменного тока ВЛ80Р № 1829 по Договору ИрГУПС с ОАО «РЖД» № 726/493 от 08.06.2010.

5. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с.

6. Ершков О.П. Расчет рельса на действие боковых сил в кривых // Тр. ЦНИИ МПС. Вып. 192. М.: Трансжелдориздат, 1960. С. 5–58.

7. Желнин Г.Г., Певзнер В.О., Шинкарев Б.С. Исследование зависимостей между показателями динамики подвижного состава и воздействия его на путь // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 542. М.: Транспорт, 1975. С. 84–92.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы / П. Т. Гребенюк [и др.] // М.: Транспорт, 1985. 287 с.
9. Комиссаров А. Ф. Итоги работы проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства за 2018 г. // Вагоны и вагонное хозяйство. Приложение к журналу «Локомотив». 2019. № 1(49). С. 5–6.
10. Черняк Ю. В., Матвиенко А. С. Определение силы тяги локомотива при производстве тягово-энергетических испытаний // Сборник научных трудов. М.: Дон I ЗТ, 2007. Т 3. № 12. С. 116–126.
11. Жуков И. В. Автономное устройство регистрации расширяет возможности испытательных поездов (Вагон тормозоиспытательный) // Вагоны и вагонное хозяйство. Приложение к журналу «Локомотив». 2019. № 1(49). С. 40–41.
12. Лукин В. В., Анисимов В. Н., Котуранов В. Н. Конструирование и расчет вагонов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. 688 с.
13. Кузович В. М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути: дисс. ... канд. техн. наук. М.: 2010. 211 с.
14. Кудрявцева Н.Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 572. М.: Транспорт, 1977. 144 с.
15. Доронин И.С. Расчет шейки оси колесной пары на продольную нагрузку // Вестник ВНИИЖТ, 1978. С. 33–34.
16. Кудрявцев Н. Н. Исследования динамики не-подрессоренных масс вагонов // Тр. ВНИИЖТ. Вып. 287. М.: Транспорт, 1965. 168 с.
17. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. М.: Новая идеология, 2002. 240 с.
18. Скалов А. Д., Коваль В. А. Методика исследования вертикальных и боковых сил при износных испытаниях рельсов // Вестник ВНИИЖТ, 1980. № 6. 216 с.

Дата поступления: 08.10.2024

Решение о публикации: 28.10.2024

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Любовь Викторовна —
соискатель; liuba.martinenko@yandex.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук,
доцент; d_kononov@mail.ru

Improvement of the system of investigation of emergency situations in railway transport

L.V. Martynenko¹, D. P. Kononov²

¹ Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia

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

For citation: *Martynenko L. V., Kononov D. P.* Improvement of the system of investigation of emergency situations in railway transport // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 866–873. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-866-873

Abstract

Purpose: to improve the safety of railway rolling stock in curves and on mountain-pass sections of the track. **Methods:** the methods of investigating emergency situations during the transportation of railway goods, as well as the main characteristics affecting the rolling stock, are given. An essential role in ensuring traffic safety is played by identifying the causes of emergency situations, which are based on data obtained during site surveys using special laboratories. After receiving the data, an appropriate analysis of the locomotive-wagon-track system is carried out in each class of this system and the ratio of deviations in these classes to the fact of a derailment or other emergency situations is calculated. **Results:** when examining the scene of the accident, the commission for the investigation of emergency situations must establish the fact of the descent. Establishing the fact of a derailment during an investigation by an expert commission may include several tasks: investigation of damage to the car and track, the extent of these damages, analysis of violations of operating rules, study of standard fractures, etc. To determine this derailment, it is necessary to collect a large statistical database and divide it into the main deviations in different classes of the entire locomotive-wagon system the way". **Practical importance:** the computational and empirical assessment and classification of the danger of various deviations in the characteristics of the system state, as well as the development of mathematical models of these processes and situations, are essential for ensuring traffic safety. This makes it possible to increase the accuracy of determining the degree of involvement of the car in the occurrence of an emergency situation in curves and in mountain-pass sections.

Keywords: traffic safety, emergency situations, the locomotive-wagon-way system, mining and transshipment sites

References

1. Rudanovskij V.M. Metodika opredeleniya prichin skhodov podvizhnogo sostava v usloviyah neopredelennostej // Vestnik VNIIZHT. 2011. No. 4. S. 10–15.
2. Gracheva L.O., Pevzner V.O., Anisimov P.S. Pokazateli dinamiki i vozdeystviya na put' gruzovyh chetyrekhosnyh vagonov pri razlichnyh iznosah telezhek i otstupleniyah ot norm sodержaniya v pryamyh uchastkah puti // Sb. nauch. tr. VNIIZHT. Vyp. 549. M.: Transport, 1976. S. 4–25.
3. Romen Yu.S., Nikolaev V.E. Issledovanie vliyaniya determinirovannyh nerovnostej puti v plane na uroven' bokovyh sil pri dvizhenii gruzovogo vagona // Problemy mekhaniki zheleznodorozhnogo transporta. Kiev: Naukova dumka, 1980. S. 40–42.
4. Mel'nichenko O. V. Protokol ekspluatatsionnyh tyagovo-energeticheskikh ispytaniy elektrovoza peregonnogo toka VL80R No. 1829 po Dogovoru IrGUPS s OAO "RZHD" No. 726/493 ot 08.06.2010.
5. Verigo M.F., Kogan A.YA. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava. M.: Transport, 1986. 560 s.
6. Ershkov O.P. Raschet rel'sa na dejstvie bokovyh sil v krivyh // Tr. CNII MPS. Vyp. 192. M.: Transzheldorizdat, 1960. S. 5–58.
7. ZHelmin G.G., Pevzner V.O., SHinkarev B.S. Issledovanie zavisimostej mezhdru pokazatelyami dinamiki podvizhnogo sostava i vozdeystviya ego na put' // Tr. VNIIZHT. Vyp. 542. M.: Transport, 1975. S. 84–92.
8. Pravila tyagovyh raschetov dlya poezdnoj raboty / P. T. Grebenyuk [i dr.] // M.: Transport, 1985. 287 s.
9. Komissarov A.F. Itogi raboty proektno-konstruktorskogo byuro vagonnogo hozyajstva za 2018 g. // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. Prilozhenie k zhurnalu "Lokomotiv". 2019. No. 1(49). S. 5–6.
10. Chernyak Yu.V., Matvienko A.S. Opredelenie sily tyagi lokomotiva pri proizvodstve tyagovo-energeticheskikh ispytaniy // Sbornik nauchnyh trudov. M.: Don I ZT, 2007. T 3. No. 12. S.116–126.
11. ZHukov I.V. Avtonomnoe ustrojstvo registratsii rasshiryaet vozmozhnosti ispytatel'nyh poezdov (Vagon tormozoispytatel'nyj) // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. Prilozhenie k zhurnalu "Lokomotiv". 2019. No. 1(49). S. 40–41.

12. Lukin V. V., Anisimov V. N., Koturanov V. N. *Konstruirovaniye i raschet vagonov: uchebnik. 2-e izd., pererab. i dop.* M.: FGOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2011. 688 s
13. Kuzovich V. M. *Dinamicheskaya nagruzhennost' specializirovannyh vagonov v krivolinejnyh uchastkah puti: diss. ... kand. tekhn. nauk.* M., 2010. 211 s.
14. Kudryavceva N. N. *Dinamicheskie nagruzki hodovyh chastej gruzovyh vagonov // Tr. VNIIZHT. Vyp. 572.* M.: Transport, 1977. 144 s.
15. Doronin I. S. *Raschet shejki osi kolesnoj pary na prodol'nuyu nagruzku // Vestnik VNIIZHT, 1978. S. 33–34.*
16. Kudryavcev N. N. *Issledovaniya dinamiki nepodressorenyh mass vagonov // Tr. VNIIZHT. Vyp. 287.* M.: Transport, 1965. 168 s.
17. Myamlin S.V. *Modelirovaniye dinamiki rel'sovyh ekipazhej.* M.: Novaya ideologiya, 2002. 240 s.
18. Skalov A.D., Koval' V.A. *Metodika issledovaniya vertikal'nyh i bokovyh sil pri iznosnyh ispytaniyah rel'sov // Vestnik VNIIZHT, 1980. No. 6.* 216 s.

Received: 08.10.2024

Accepted: 28.10.2024

Author's information:

Lyubov' V. MARTYNENKO — the applicant;

liuba.martinenko@yandex.ru

Dmitry P KONONOV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor; d_kononov@mail.ru



УДК 624.042.13

Физическое моделирование как инструмент верификации при решении задач геомеханики

А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков

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

Для цитирования: Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Физическое моделирование как инструмент верификации при решении задач геомеханики // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 874–890. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-874-890

Аннотация

Цель: выполнить верификацию математической модели участка сопряжения перегонного и станционного тоннеля метрополитена путем создания физической модели методом эквивалентных материалов. Проанализировать формирование вертикальных нагрузок от горного давления на обделку тоннелей с учетом выбранной последовательности производства работ. По результатам моделирования сделать вывод о влиянии станционного тоннеля и торцевой стены на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля, определить размеры этой области влияния. **Методы:** метод конечных элементов в комбинации с аналитическим методом (математическое моделирование), метод эквивалентных материалов (физическое моделирование). **Результаты:** выявлены закономерности распределения нагрузок от вертикального горного давления на обделку перегонного тоннеля на участке сопряжения с пилонной станцией глубокого заложения. Установлено, что на подходе к торцевой стене станции обделка перегонного тоннеля воспринимает вертикальную нагрузку от горного давления, превышающую нагрузку на обделку вне области влияния станции примерно в 2–4 раза. При этом установлено, что начальные деформации станционной выработки приводят к увеличению нагрузки на перегонный тоннель. Таким образом, прогноз нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля рационально выполнять с учетом начальных деформаций станционной выработки. Установлено, что граница области влияния станционного тоннеля на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля на участке их сопряжения практически не зависит от глубины заложения и может быть принята равной 7 м. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования узла сопряжения перегонного и станционного тоннелей для определения протяженности участка перегонного тоннеля с усиленной обделкой.

Ключевые слова: метод конечных элементов, метод эквивалентных материалов, метрополитен, перегонный тоннель, станционный тоннель

Введение

Основным методом решения задач механики подземных сооружений (геомеханики) в настоящее время является метод конечных элементов, относящийся к области математического моделирования. Параллельное развитие высокопроизводительной компьютерной техники и специализированных расчетных программных

комплексов привело к повсеместному распространению метода конечных элементов как в инженерной, так и в научной среде, а проведение процедуры сертификации обеспечивает достоверность получаемых результатов при использовании программного комплекса и минимизирует вероятность ошибок расчета.

Вместе с тем у математического моделирования существует недостаток на самом фундаментальном, методологическом уровне. Оно является методом абстрагирования, при котором объекты физической реальности заменяются их математическими абстракциями, например, стержнями, оболочками, пружинами. Таким образом, при решении сложных задач, к которым относятся задачи механики подземных сооружений, перед ученым встает вопрос о правомерности самых базовых утверждений: гипотезы сплошной среды, модели местных деформаций и т. п.

В свою очередь, физическое моделирование можно назвать отражением реальности посредством создания уменьшенных копий тех или иных объектов, имеющих ту же физическую природу. Так, в методе эквивалентных материалов через закон подобия определяют значения основных физико-механических характеристик уменьшенных копий объектов моделирования, после чего подбираются их физические эквиваленты [1]. Применительно к задачам геомеханики главным преимуществом метода эквивалентных материалов является возможность создания грунтовых массивов, наиболее приближенных к реальным: с естественной неоднородностью физико-механических характеристик, с анизотропией, проявляющейся в слоистости грунтов, с повышением плотности и прочности грунта от верхних слоев к нижним.

С точки зрения научной методологии физическое моделирование может являться инструментом верификации математического моделирования при решении сложных задач или разработке новых алгоритмов расчета [2–9].

Одна из таких задач была решена на кафедре «Тоннели и метрополитены» в рамках исследования напряженно-деформированного состояния узла сопряжения перегонного

и стационарного тоннелей метрополитена на глубоком заложении в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

Построение математической модели

По причине больших пролетов станций и наличия над верхнекотлинскими глинами слабых слоев четвертичных отложений стационарные конструкции рассчитываются на полный вес вышележащих грунтов. В то же время над перегонными тоннелями метрополитена непосредственно на подходе к станциям мощность слоя верхнекотлинских глин колеблется в зависимости от типа и глубины заложения станции в пределах 15–35 м, что является достаточным для формирования нагрузок от горного давления непосредственно вблизи обделки перегонного тоннеля.

В рамках математического моделирования рассмотрен узел сопряжения обделки перегонного тоннеля метрополитена с торцевой стеной глухого участка бокового тоннеля пилонной станции (рис. 1).

В принятой схеме производства работ вначале выполнялась проходка перегонного тоннеля, а затем — навстречу ему проходка стационарного тоннеля с устройством торцевой стены.

Обделка перегонного тоннеля состоит из железобетонных усиленных тубингов наружным диаметром 5,64 м, обделка стационарного тоннеля — из железобетонных тубингов наружным диаметром 9,8 м. Толщина торцевой стены была принята равной 1 м.

В настоящее время для упрощения инженерных расчетов сборные блочные обделки тоннелей принято моделировать пространственными трубами сплошного сечения [10–12]. Такой подход оправдан для принципиальной оценки геомеханических процессов системы «обделка — грунтовый массив» [13,

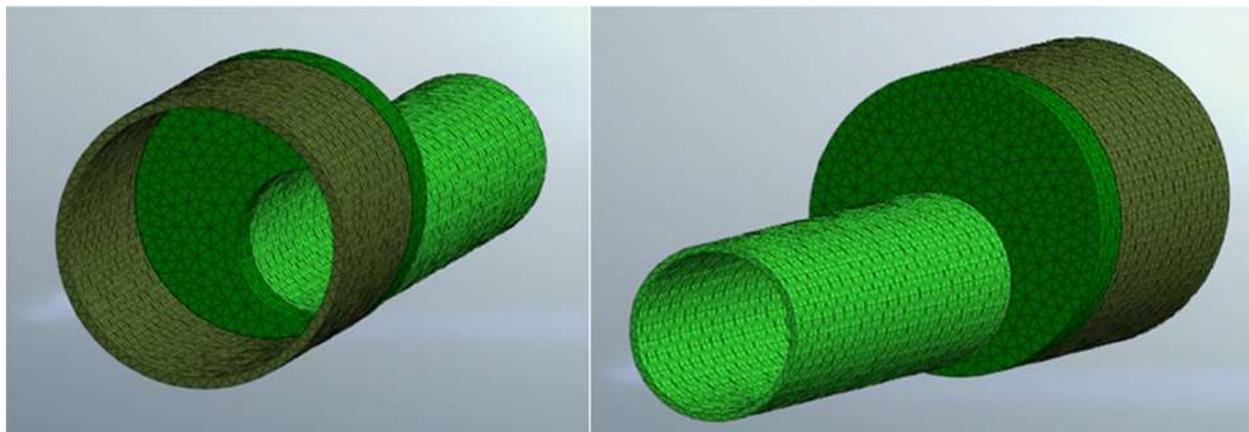


Рис. 1. Конечно-элементная модель участка сопряжения перегонного и стационарного тоннелей (грунтовый массив не показан)

14] и для определения осадок дневной поверхности [15]. В случае тьюбинговых тоннельных обделок расчетные сечения моделируемой обделки также можно заменить на сплошные (приведенные), исходя из следующего равенства жесткостей:

$$EI = E \frac{bh^3}{12}, \quad (1)$$

откуда высота сечения сплошной обделки приведенной жесткости определяется как

$$h = \sqrt[3]{\frac{12I}{b}}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости обделки;

I — момент инерции расчетного сечения тьюбинговой обделки;

b — ширина кольца обделки.

Авторами было выполнено исследование правомерности такого упрощения [16, 17]. Установлено, что моделирование тьюбинговых обделок кольцами эквивалентной жесткости позволяет предварительно оценить порядок напряжений, тогда как детальный расчет показывает наличие концентраций напряжений в конкретных элементах тьюбнгов, причем их значения существенно отличаются от среднего уровня напряжений. Одновременно с этим в части напряжений

на контакте обделки и массива (нагрузки от горного давления) не наблюдается значимой разницы при представлении элементов обделки тьюбингами или приведенными сечениями.

Математическое моделирование было выполнено в специализированном расчетном геотехническом комплексе MIDAS GTS NX. Физико-механические характеристики конечных элементов обделки приняты как для бетона класса В45 следующими:

- модуль упругости $E = 37500$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$;
- объемный вес $\gamma = 2,5$ т/м³.

Грунтовый массив рассматривался как однородный, изотропный, квазисплошной. Применяемая геомеханическая модель в MIDAS GTS NX — модель Кулона — Мора. Значения физико-механических характеристик верхнекотлинских глин принимались следующими:

- объемный вес грунта $\gamma = 2,2$ т/м³;
- усредненный объемный вес вышележащих грунтов $\gamma_Q = 1,9$ т/м³;
- угол внутреннего трения в массиве $\varphi = 23^\circ$;
- сцепление $C = 81$ кПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$;
- секущий модуль упругости $E_{50} = 200$ МПа.

Грунтовый массив и расположенная в нем конструкция разбиты на конечное число элементов со сгущением сетки вблизи конструкции. На боковых границах массива установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений.

Толща ненарушенных верхнекотлинских глин над обделкой станционного тоннеля принята равной 10 м. Вышележащие слои грунта заменены равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к верхней границе массива. В нашем случае нагрузка прикладывалась переменной: 380, 570 и 760 кПа, что соответствует мощности четвертичных отложений 20, 30 и 40 м соответственно.

Программный комплекс MIDAS GTS NX способен выполнять расчеты с учетом стадийности проходки, что позволяет делать оценку напряженно-деформированного состояния массива и конструкций подземных сооружений на всех ключевых этапах строительства.

На I этапе расчета рассматривался однородный грунтовый массив для создания начального поля напряжений. При этом конечным элементом, моделирующим обделку, присваивались характеристики грунта. По результатам расчета I этапа все перемещения обнулялись с сохранением бытовых напряжений.

На II этапе расчета моделировалось свободное деформирование незакрепленной выработки при сооружении перегонного тоннеля, в результате которого происходит перераспределение напряжений на ее контуре: снижение напряжений в сводовой части и увеличение в боках выработки. Для создания начальных деформаций контура выработки в модели выключались конечные элементы выемки и обделки, а на грунт изнутри тоннеля прикладывалось противодавление βp , определенное аналити-

ческим методом (подробнее про β -метод и его модернизацию см. [18]).

На III этапе расчета моделировалось возведение обделки перегонного тоннеля путем включения соответствующих конечных элементов и присвоения им характеристик железобетона.

На следующих этапах выполнялось моделирование участка станционного тоннеля. При этом возможны два способа включения станционной конструкции в работу с грунтовым массивом:

- с учетом свободного деформирования незакрепленной выработки по аналогии с проходкой перегонного тоннеля;
- путем активации конечных элементов конструкций непосредственно в напряженном массиве.

Для наиболее полного сравнительного анализа результатов применялись оба этих способа. Для этого в программном комплексе MIDAS GTS NX был создан еще один расчетный случай, отличающийся от первого введением дополнительного этапа расчета III'.

На этапе III' по аналогии с II этапом моделировалось свободное деформирование незакрепленной выработки при сооружении станционного тоннеля и торцевой стены с применением аналитического метода.

На заключительном, IV этапе расчета моделировалось возведение обделки станционного тоннеля и торцевой стены путем включения соответствующих конечных элементов и присвоения им характеристик железобетона.

Таким образом, в первом расчетном случае при моделировании сооружения участка пилонной станции этап III' учитывался, а во втором программный комплекс пропускал этот этап, сразу переходя к заключительному, IV этапу.

В результате решения задач были получены изополя напряжений и деформаций в грунтовом

массиве и строительных конструкциях. При этом основным исследуемым параметром являлась вертикальная составляющая напряжения в массиве на контакте «обделка — грунт» в шельге свода перегонного тоннеля, торцевой стены и стационарного тоннеля (рис. 2).

По результатам моделирования установлено, что учет начальных деформаций выработки приводит к уменьшению результирующего горного давления на обделку стационарного тоннеля примерно в 2 раза по сравнению с начальными напряжениями в массиве. Такой результат полностью согласуется с физикой геомеханических процессов, но не учитывает более сложного поведения реального грунтового массива. Результаты натурных исследований, обобщенные К. П. Безродным, Н. И. Кулагиным и П. А. Деменковым [19–21], указывают на то, что длительные реологические процессы в протерозойских глинах приводят к посте-

пенному увеличению вертикальных нагрузок от горного давления на обделку стационарных тоннелей от 0,5 γH сразу после строительства станции до 0,8–1,0 γH спустя один-два года наблюдений.

Таким образом, с точки зрения прогноза развития нагрузок от горного давления на обделку более достоверным является расчет без учета начальных деформаций выработки стационарного тоннеля.

При этом для оценки НДС обделки перегонного тоннеля следует учитывать начальные деформации выработки стационарного тоннеля, поскольку они оказывают значительное влияние на формирование вертикальной нагрузки на обделку перегонного тоннеля. Так, величина нагрузок на обделку перегонного тоннеля оказывается выше в 2 раза при учете начальных деформаций выработки стационарного тоннеля.

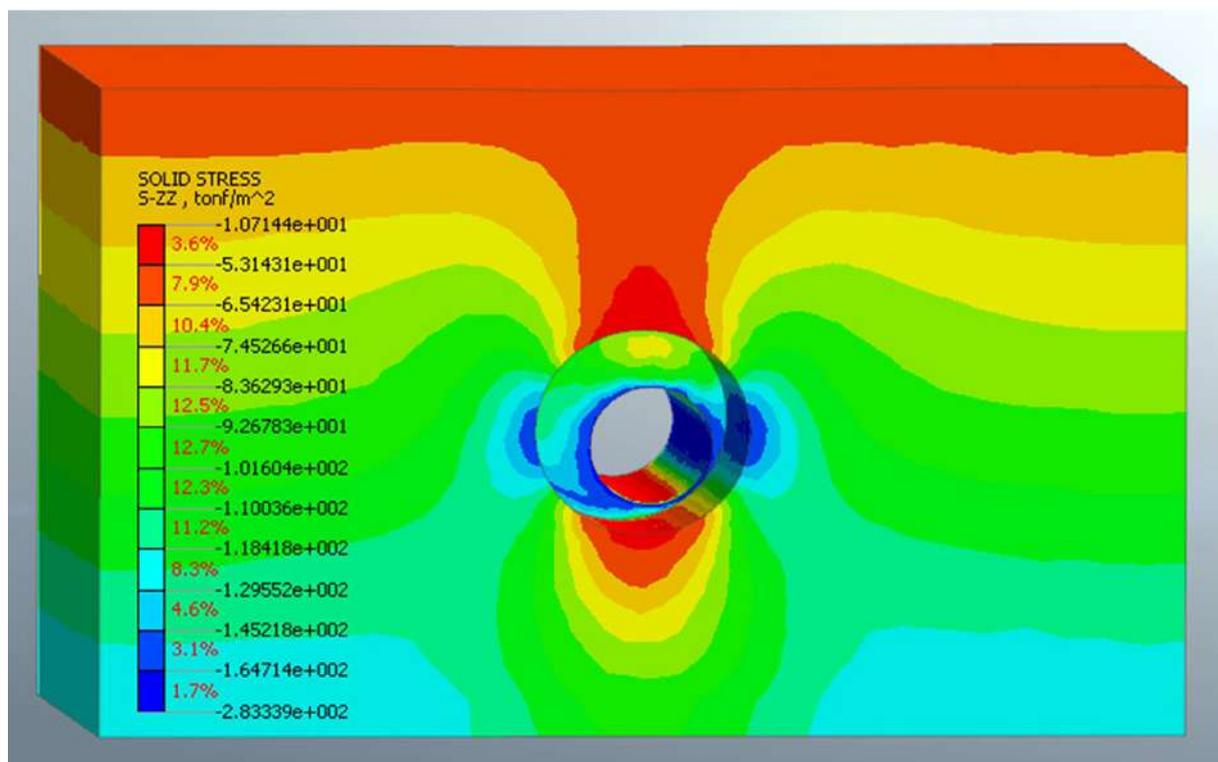


Рис. 2. Изополя вертикальных напряжений в массиве на заключительном этапе расчета

Построение физической модели

С целью верификации методики математического моделирования выполнено физическое моделирование участка сопряжения перегонного и станционного тоннелей с учетом выбранной технологической схемы проходки с применением метода эквивалентных материалов.

Подбор эквивалентного материала грунта выполнен с учетом масштаба моделирования 1:20 в соответствии с формулами теории подобия [1]:

$$E_{\text{ом}} = \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} \cdot \frac{l}{L} \cdot E_{\text{он}}, \quad (3)$$

$$C_{\text{м}} = \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} \cdot \frac{l}{L} \cdot C_{\text{н}}, \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{м}} = \varphi_{\text{н}}, \quad (5)$$

где $\frac{l}{L}$ — масштаб моделирования; E_0 — модули общей деформации; C — сцепления; φ — углы внутреннего трения модели и натуре.

Обделки моделировались пространственными гипсовыми трубами с толщиной стен, приведенной к изгибной жесткости тубинговой обделки:

$$E_{\text{м}} I_{\text{м}} = \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} \cdot \frac{l_{\text{м}}^5}{L_{\text{н}}^5} \cdot E_{\text{н}} I_{\text{н}}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости, I — момент инерции сечения обделки.

По результатам сдвиговых и стабилметрических испытаний определены значения физико-механических характеристик материала грунта [22, 23]. Результаты сравнения фактических характеристик состава с расчетными представлены в табл. 1.

Испытательный стенд моделирования (рис. 3) выполнен в виде металлической рамной конструкции из элементов стального проката. Ограждающие конструкции фронтальных и боковых стенок собраны из швеллеров,

уголков и плит из толстой фанеры и оргстекла. Во фронтальных стенках имеются вырезы по формам конструкций обделок станционного и перегонного тоннелей.

Ширина фронтальных стенок стенда принята равной 1600 мм. Таким образом, боковые стенки отстоят от перегонного тоннеля более чем на два его диаметра и тем самым ограничивают зону влияния выработки перегонного тоннеля. Расстояние от низа перегонного тоннеля до лотка стенда было принято равным одному диаметру. Высота моделируемого грунтового массива принята 10 м, как и в математической модели. Ширина боковых стенок стенда определена с учетом размещения участка сопряжения станционного и перегонного тоннелей, а также конструкции торцевой стены и составляет 800 мм.

Подобранный эквивалентный материал уложен в стенд в разогретом состоянии слоями 3 см с последующей укаткой.

Далее выполнялись пригруз стенда до величины нагрузки от полного веса столба грунта над тоннелем и выдержка его до полной стабилизации напряжений в массиве. Переменная мощность четвертичных отложений над кровлей верхнекотлинских глин (соответствующие в натуре 20 м, 30 м и 40 м) моделировалась пригрузом чугунами отливками. Влияние городской застройки при данной постановке эксперимента не учитывалось, поскольку ее вклад в горное давление оценивается величиной не более 2–5 % [24].

В индивидуальных деревянных опалубках изготавливались обделки перегонного и станционного тоннелей участками по 10 см (для удобства последующего монтажа). В дальнейшем эти участки склеивались между собой эпоксидным клеем с оставлением зазоров для вывода датчиков измерения контактного давления.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические характеристики грунта натуры и модели

Физико-механические характеристики	Натуры	Модели		Погрешность
		Расчетные	Подобранные	
Плотность	$\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 1,66 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 1,66 \text{ г/см}^3$	–
Угол внутреннего трения	$\varphi = 23^\circ$	$\varphi = 23^\circ$	$\varphi = 23^\circ$	0 %
Сцепление	$C = 100 \text{ кПа}$	$C = 3,62 \text{ кПа}$	$C = 3,2 \text{ кПа}$	13 %
Модуль общей деформации	$E = 100 \text{ МПа}$	$E = 3,62 \text{ МПа}$	$E = 3,2 \text{ МПа}$	13 %

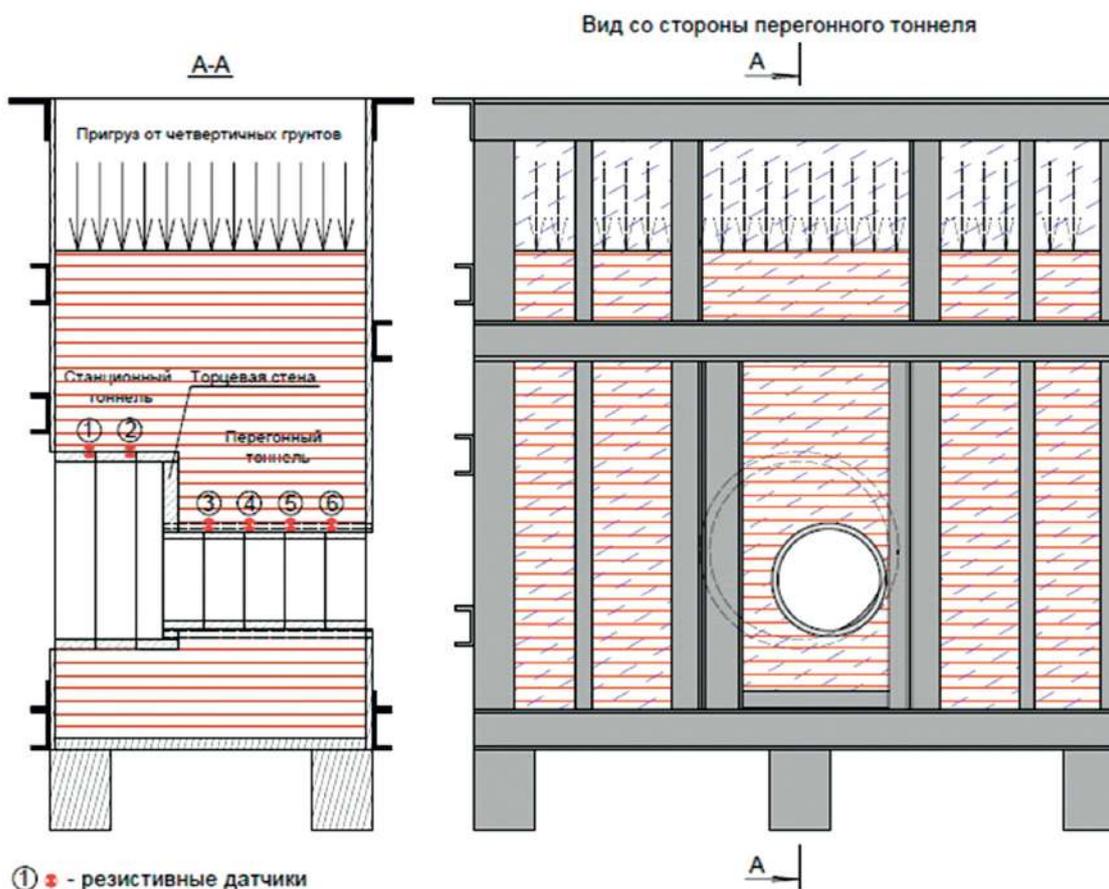


Рис. 3. Принципиальная схема испытательного стенда

В продольном направлении участок сопряжения обделок перегонного и станционного тоннелей разбит на шесть измерительных профилей с установленными на обделки датчиками контактного давления FSR-402 фирмы Interlink Electronics. Датчик представляет собой тонкую и гибкую печатную плату с круглой активной областью диаметром 1,47 см.

Она выполнена в виде двухслойной конструкции, каждый слой которой состоит из гибкого основания (полиэфирная пленка толщиной 0,2 мм), слоя проводящего материала (серебро) и слоя резистивной пленки. Серебряный слой простирается от активной области к паяным разъемам на конце датчика, которые позволяют включать его в цепь.

Датчики устанавливались на наружную поверхность моделей обделок с выводом проводов внутрь тоннелей через стыки обделок (рис. 4а, 4б).

Торцевая стена (рис. 4в) изготавливалась в индивидуальной опалубке с обеспечением зазоров величиной ~10 мм по всему перимет-

ру для последующего заполнения свежим гипсовым раствором при моделировании проходки тоннелей. Толщина торцевой стены была принята равной 50 мм, что соответствует 1 м в натуре.

Разработка грунта выполнялась от калотты к лотку на величину заходки 50 мм (1 м



Рис. 4. Моделирование обделок перегонного и станционного тоннелей:

а, б — обделки перегонного и станционного тоннелей соответственно с установленными датчиками давления; в — модель торцевой стены; г — рама продавливания, установленная на стенд со стороны перегонного тоннеля

в натуре) с доработкой контура выработки специальными ножами, вырезанными из листовой стали. Ножи имели вырез, равный толщине обделок с учетом зазора в 2 мм. Таким образом, общий зазор между обделкой и грунтом составлял ~4–5 мм, что соответствует 80–100 мм в натуре.

После каждой заходки модели обделок задвигались в испытательный стенд домкратом рамы продавливания (рис. 4г). Этапы моделирования проходки перегонного и стационарного тоннелей представлены на рис. 5.

По завершении проходки перегонного и стационарного тоннелей со стороны станции



Рис. 5. Моделирование проходки перегонного и стационарного тоннелей:

а, б — разработка грунта с постепенным задавливанием обделки перегонного тоннеля в грунтовый массив; в — вид на забой из перегонного тоннеля; г — проходка стационарного тоннеля

устанавливалась торцевая стена с заполнением зазоров между ней и обделками тоннелей свежим гипсовым раствором (рис. 6).

Общий вид физической модели после выполнения проходки тоннелей представлен на рис. 7. Для дополнительного контроля измерений были установлены четыре датчика перемещений в сводах и лотках станционного и перегонного тоннеля.

По завершении моделирования тоннельных конструкций снимались начальные показания по датчикам, после чего выполнялся пригруз модели нагрузкой, эквивалентной

весу 20 м четвертичных отложений. Через трое суток показания с датчиков снимались повторно, после чего добавлялась нагрузка, эквивалентная еще 10 м четвертичных отложений. Эта процедура повторялась еще через трое суток.

Результаты эксперимента представлены на рис. 8 в виде графиков, соотнесенных с результатами математического моделирования.

По результатам физического моделирования нагрузка от горного давления на обделку станционного тоннеля оказалась ближе к результатам математического моделирования

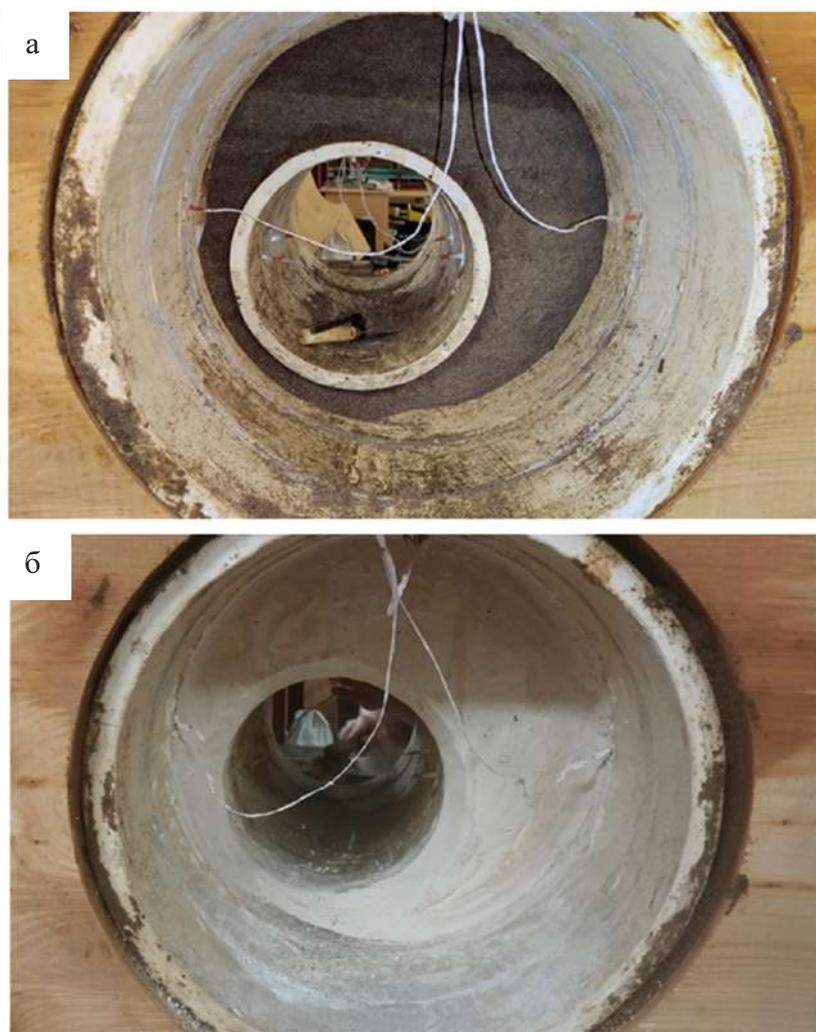


Рис. 6. Моделирование создания торцевой стены: а — момент сбойки станционного и перегонного тоннелей; б — монтаж модели торцевой стены



Рис. 7. Общий вид физической модели узла сопряжения перегонного и станционного тоннеля:
 а — вид со стороны перегонного тоннеля; б — вид со стороны станционного тоннеля

без учета начальных деформаций станционной выработки (синие кривые на графиках).

Вместе с тем нагрузка от горного давления на обделку перегонного тоннеля по результатам физического моделирования оказалась выше, чем при математическом моделировании без учета начальных деформаций станционной выработки, то есть ближе к красным кривым.

Кажущееся противоречие может быть обусловлено тем, что в физическом эксперименте по периметру установленной торцевой стены предусматривались зазоры, впоследствии заполняемые гипсовой смесью. Также зазоры образовались и на контакте торцевой стены с грунтовым массивом. Эти зазоры могли вызвать некоторые деформации обделок и грунта вблизи торцевой стены, что и нашло отражение

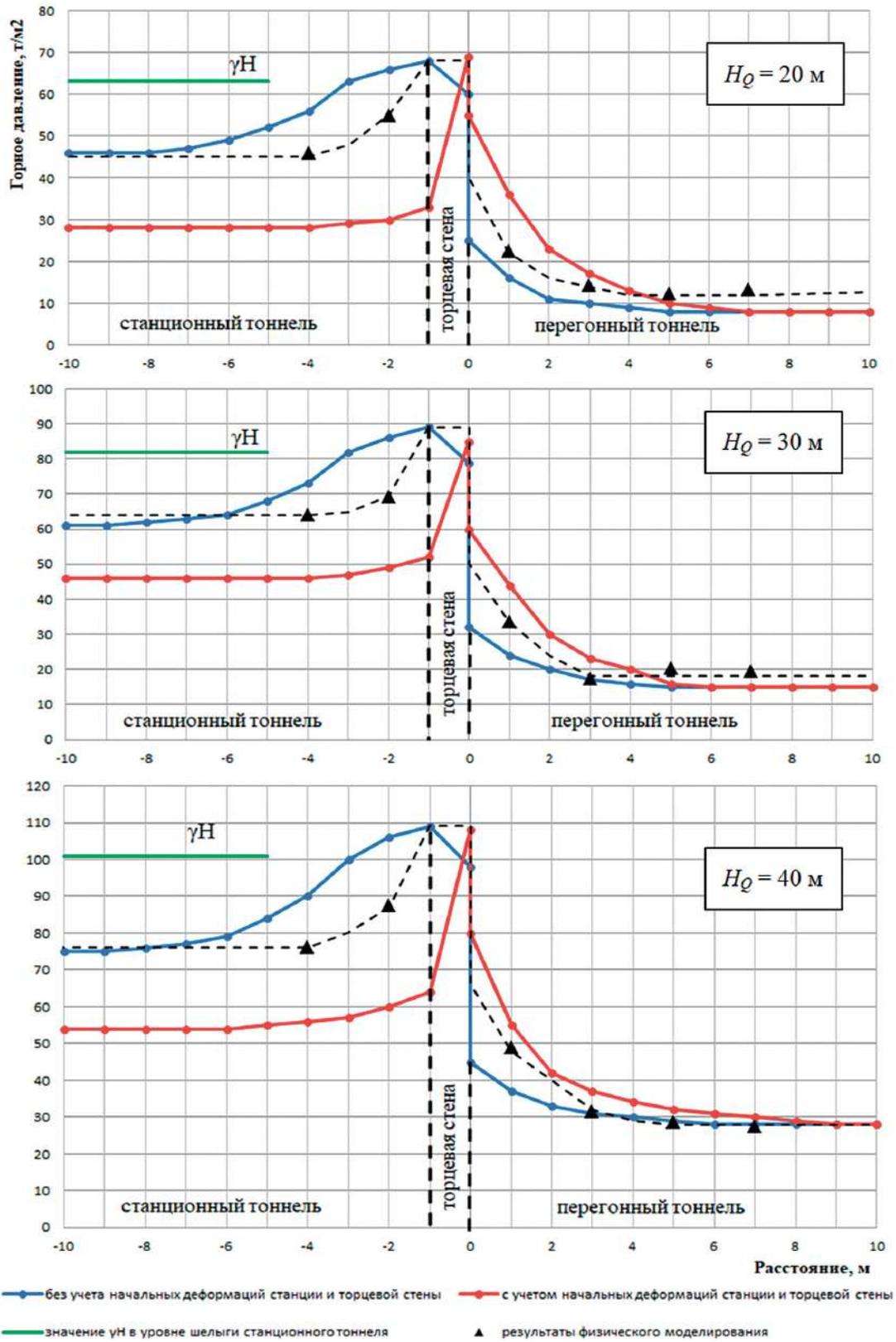


Рис. 8. Вертикальная нагрузка от горного давления на свод станционного и перегонного тоннеля

в росте нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля. Таким образом, такое «противоречие» только подтверждает корректность рассмотренных математических моделей.

Протяженность области влияния станции на перегонный тоннель составляет приблизительно 5–7 м. Размеры этой области практически не зависят от уровня напряжений в массиве (от глубины заложения), то есть в первую очередь определяются геометрией системы. Результаты выполненного исследования можно распространить и на колонные станции глубокого заложения ввиду принципиальной схожести их геометрии в части расположения перегонных тоннелей.

Выводы

1. По результатам математического моделирования и последующей верификации на физической модели выявлены закономерности распределения нагрузок от вертикального горного давления на обделку перегонного тоннеля на участке сопряжения с пилонной станцией глубокого заложения при схеме производства работ, заключающейся в сооружении перегонного, а затем станционного тоннеля.

1.1. На подходе к торцевой стене станции обделка перегонного тоннеля воспринимает вертикальную нагрузку от горного давления, превышающую нагрузку на обделку вне области влияния станции примерно в 2–4 раза. При этом установлено, что начальные деформации станционной выработки приводят к увеличению нагрузки на перегонный тоннель.

1.2. Обделка станционного тоннеля вне торцевой стены воспринимает нагрузку от горного давления в значении $0,5–0,8 \gamma H$, где нижняя граница соответствует расчету с учетом начальных деформаций выработки станционно-

го тоннеля, верхняя — без учета начальных деформаций, что является более доверительным в отношении прогноза напряженно-деформированного состояния станционной обделки. Вместе с тем прогноз нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля рационально выполнять с учетом начальных деформаций станционной выработки.

2. Установлено, что граница области влияния станционного тоннеля на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля на участке их сопряжения практически не зависит от глубины заложения и может быть принята равной 7 м.

3. Результаты выполненного исследования можно распространить и на колонные станции глубокого заложения ввиду принципиальной схожести их геометрии в части расположения перегонных тоннелей. Перспективным направлением развития темы является разработка конструктивно-технологических решений участка сопряжения перегонного тоннеля и торцевой стены станции при других вариантах организации схемы производства работ.

Библиографический список

1. Моделирование проявлений горного давления / Г. Н. Кузнецов [и др.]. Ленинград: Недра, 1968. 280 с.
2. Huang G., Qiu W., Zhang H. Numerical simulation of mechanism behavior of the horizontal stratum tunnel adopting 3 Dimensional Element Code (3DEC) // Underground — the way to the future! World Tunnel Congress. Geneva, 2013. P. 830–835.
3. Hwang Ch. H., Jung Ch. G., Lee S. D. Behaviour of the cut-and-cover tunnel in unsymmetrical condition // World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
4. Фролов Ю. С., Коньков А. Н., Ларионов А. А. Решение задач геомеханики методом физического

моделирования при строительстве метрополитена в Санкт-Петербурге // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 71–73.

5. Frolov Y.S., Konkov A.N., Larionov Frolov A.A. Scientific substantiation of constructive-technological parameters of St. Petersburg subway underground structures // Transportation Geotechnics and Geoecology, TGG 2017 (17–19 May 2017). Saint Petersburg, 2017. P. 673–680.

6. Dong K. K., Bum J. O., Lee S.-D. Optimal pillar width of twin tunnels in horizontal jointed rock // World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.

7. Kim H.-M., Lee S.-D. Load on pillar and block displacement during two-arch tunnel excavation in jointed rock mass // World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.

8. A study of the invert tunnel’s behavior in a weathered-rock using laboratory model test and numerical analysis / K. J. Kim [at al.] // Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 501–506.

9. Loads on the center pillar of two-arch tunnel under the influence of discontinuity planes in the ground // S. D. Lee [at al.] // Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 533–537.

10. Structural forces in segmental linings: process-oriented tunnel advance simulations vs. conventional structural analysis / A. Marwan [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 111.

11. Study on Mechanical Behavior and the Model Test of Segmental Linings for the Shield Tunnel Undercrossing the Yellow River / Y. Fang [at al.] // Procedia Engineering. 2016. Vol. 166. P. 19–31.

12. Simulating tunnel support integrity using FEM and FDEM based on laboratory test data / H. Johnson [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 111.

13. Study on the long-term performance of cement-sodium silicate grout and its impact on segment lining structure in synchronous backfill grouting of shield tunnels / Sh. Wang [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 92.

14. Minimum cover depth estimation for underwater shield tunnels / G. Panpan [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 115.

15. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of mechanized twin tunnels in soil-rock mass mixed ground / Z. Zhong [at al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 110.

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

17. Konkov A. N., Sokornov A. A., Korolev K. V. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced sections // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 402. Springer, Cham, 2022. Vol. 1. P. 568–576.

18. Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов // Путевой навигатор. 2022. № 50 (76). С. 36–44.

19. Кулагин Н. И. Исследование рациональных методов сооружения односводчатых станций метрополитена в протерозойских глинах: дисс. ... канд. техн. наук. Ленинград: ЛГИ, 1977.

20. Безродный К. П. Исследование особенностей статической работы элементов конструкции односводчатых станций метрополитена в протерозойской глине: дисс. ... канд. техн. наук. Ленинград: ЛГИ, 1978.

21. Деменков П. А. Геомеханическое обоснование метода расчета нагрузок на станции колонного типа метрополитена глубокого заложения: дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТИ, 2004.

22. Sokornov A. A., Shaposhnikov E. A., Konkov A. N. Laboratory test of equivalent material as artificial ground // E3S Web Conf. Vol. 157. Key Trends in Transportation Innovation (КТТИ-2019), 2020.

23. Сокольников А. А., Шапошников Е. А., Коньков А. Н. Лабораторные испытания искусственных грунтов // Путь навигатор. 2019. № 41 (67). С. 49–55.

24. Определение добавочного давления на подземные сооружения метрополитена от наземного

строительства / А. А. Сокольников [и др.] // Путь навигатор. 2020. № 42 (68). С. 36–41.

Дата поступления: 11.08.2024

Решение о публикации: 21.09.2024

Контактная информация:

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

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент; anlonkov@pugpstm.ru

Physical modeling as a verification tool for geomechanical tasks solving

A. A. Sokornov, A. N. Kon'kov

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

For citation: Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Physical modeling as a verification tool for geomechanical tasks solving // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 874–890. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-874-890

Abstract

Purpose: to verify the mathematical model of the interstation and station subway tunnels junction section by creating a physical model using the method of equivalent materials. To analyze the formation of vertical loads from ground pressure on the tunnel linings, taking into account the selected sequence of work. To establish the station tunnel and its face wall influence on the interstation tunnel lining stress-strain state, and determine the size of this area of influence based on the simulation results. **Methods:** the finite element method in combination with the analytical method (mathematical modeling), the method of equivalent materials (physical modeling). **Results:** patterns of load distribution from vertical ground pressure on the interstation tunnel lining at the interface with the deep shallow pylon station have been revealed. It was found that on the approach to the face wall of the station, the interstation tunnel lining perceives the vertical load from the ground pressure, exceeding the load on the lining outside the area of the station influence by about 2–4 times. In addition, it was found that the initial deformations of the station workings lead to an increase in the load on the interstation tunnel. Thus, it is rational to forecast the load from the ground pressure on the interstation tunnel lining, taking into account the initial deformations of the station workings. It is established that the boundary of the station tunnel influence area on the stress-strain state of the interstation tunnel lining practically does not depend on the depth of laying and can be assumed to be 7 m. **Practical significance:** the results of the study can be used at the design stage of the interstation and station tunnel junction to determine the length of the interstation tunnel section with reinforced lining.

Keywords: finite element method, equivalent materials method, subway, interstation tunnel, station tunnel

References

1. Modelirovanie proyavlenij gornogo davleniya / G. N. Kuznecov [i dr.]. Leningrad: Nedra, 1968. 280 s. (In Russian)
2. Huang G., Qiu W., Zhang H. Numerical simulation of mechanism behavior of the horizontal stratum tunnel adopting 3 Dimensional Element Code (3DEC) // *Underground — the way to the future!* World Tunnel Congress. Geneva, 2013. P. 830–835.
3. Hwang Ch. H., Jung Ch. G., Lee S. D. Behaviour of the cut-and-cover tunnel in unsymmetrical condition // *World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”*. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
4. Frolov Yu. S., Kon'kov A. N., Larionov A. A. Reshenie zadach geometriki metodom fizicheskogo modelirovaniya pri stroitel'stve metropolitena v Sankt-Peterburge // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. No. 9. S. 71–73. (In Russian)
5. Frolov Y. S., Konkov A. N., Larionov Frolov A. A. Scientific substantiation of constructive-technological parameters of St. Petersburg subway underground structures // *Transportation Geotechnics and Geoecology, TGG 2017 (17–19 May 2017)*. Saint Petersburg, 2017. P. 673–680.
6. Dong K. K., Bum J. O., Lee S.-D. Optimal pillar width of twin tunnels in horizontal jointed rock // *World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”*. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
7. Kim H.-M., Lee S.-D. Load on pillar and block displacement during two-arch tunnel excavation in jointed rock mass // *World Tunnel Congress “Safe Tunnelling for the City and for the Environment”*. The 35th ITA-AITES general assembly. Hungary, 2009.
8. A study of the invert tunnel's behavior in a weathered-rock using laboratory model test and numerical analysis / K. J. Kim [at al.] // *Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises*. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 501–506.
9. Loads on the center pillar of two-arch tunnel under the influence of discontinuity planes in the ground // S. D. Lee [at al.] // *Underground Space — the 4th Dimension of Metropolises*. Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál, 2007. P. 533–537.
10. Structural forces in segmental linings: process-oriented tunnel advance simulations vs. conventional structural analysis / A. Marwan [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111.
11. Study on Mechanical Behavior and the Model Test of Segmental Linings for the Shield Tunnel Undercrossing the Yellow River / Y. Fang [at al.] // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 166. P. 19–31.
12. Simulating tunnel support integrity using FEM and FDEM based on laboratory test data / H. Johnson [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111.
13. Study on the long-term performance of cement-sodium silicate grout and its impact on segment lining structure in synchronous backfill grouting of shield tunnels / Sh. Wang [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 92.
14. Minimum cover depth estimation for underwater shield tunnels / G. Panpan [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 115.
15. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of mechanized twin tunnels in soil-rock mass mixed ground / Z. Zhong [at al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 110.
16. Kon'kov A. N., Sokornov A. A. Analiz rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya tyubingovyh tonnel'nyh obdelok pri ispol'zovanii privedennyh sechenij // *III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov: v 2 t. SPb.: PGUPS, 2021. T. 1. S. 207–209*. (In Russian)
17. Kon'kov A. N., Sokornov A. A., Korolev K. V. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced sections // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol 402. Springer, Cham, 2022. Vol. 1. P. 568–576.

18. Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Modelirovanie prohodki tonnelya glubokogo zalozheniya v metode konechnyh elementov // Putevoj navigator. 2022. No. 50 (76). S. 36–44. (In Russian)
19. Kulagin N. I. Issledovanie racional'nyh metodov sooruzheniya odnosvodchatyh stancij metropolitena v proterozojskih glinah: diss. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LGI, 1977. (In Russian)
20. Bezrodnyj K. P. Issledovanie osobennostej staticheskoj raboty elementov konstrukcii odnosvodchatyh stancij metropolitena v proterozojskoj gline: diss. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LGI, 1978. (In Russian)
21. Demenkov P. A. Geomekhanicheskoe obosnovanie metoda rascheta nagruzok na stancii kolonnogo tipa metropolitena glubokogo zalozheniya: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: SPbGGI, 2004. (In Russian)
22. Sokornov A. A., Shaposhnikov E. A., Konkov A. N. Laboratory test of equivalent material as artificial ground // E3S Web Conf. Vol. 157. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019), 2020.
23. Sokornov A. A., Shaposhnikov E. A., Kon'kov A. N. Laboratornye ispytaniya iskusstvennyh gruntov // Putevoj navigator. 2019. № 41 (67). S. 49–55. (In Russian)
24. Opredelenie dobavochnogo davleniya na podzemnye sooruzheniya metropolitena ot nazemnogo stroitel'stva / A. A. Sokornov [i dr.] // Putevoj navigator. 2020. № 42 (68). S. 36–41. (In Russian)

Received: 11.08.2024

Accepted: 21.09.2024

Author's information:

Anton A. SOKORNOV — senior lecturer;
scarlunch@mail.ru

Alexandr N. KON'KOV — PhD of Engineering,
Associate Professor; ankonkov@pgupstm.ru

УДК 628.31

Критерии оценки эффективности технологий очистки городских сточных вод в соответствии с современным законодательством

О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская

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

Для цитирования: Капинос О. Г., Твардовская Н. В. Критерии оценки эффективности технологий очистки городских сточных вод в соответствии с современным законодательством // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 891–901. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-891-901

Аннотация

Цель: выявить критерии оценки и основные пути повышения эффективности технологии очистки городских сточных вод. Представить необходимый обязательный минимум стадий очистки сточных вод, обеспечивающий охрану поверхностных водных объектов от загрязняющих веществ. Обосновать выбор технологических схем станций очистки городских канализационных стоков различной производительности в соответствии с актуальными нормативными актами. **Методы:** проведен комплексный анализ и систематизация существующих нормативных документов в области очистки бытовых сточных вод и влияния сброса очищенных вод на экологическое состояние поверхностных водных объектов. Выполнены сравнение и анализ влияния отдельных сооружений на работу технологической цепочки городской канализационной станции. **Результаты:** рассмотрены современные критерии оценки работы городских канализационных станций, которые по современным нормативным требованиям являются одними из главных непосредственных загрязнителей окружающей среды. Представлены четыре взаимосвязанных, последовательных и обязательных этапа очистки бытовых сточных вод, которые должны применяться на станциях любой производительности. Показана взаимосвязь получения комплексного экологического разрешения и создания, обоснования программы повышения экологической эффективности для городской канализационной станции, их влияние на повышение эффективности и надежности работы очистных сооружений. Выявлены конкретные устройства и сооружения, модернизация и/или реконструкция которых позволяет наиболее эффективно и поэтапно достигать современных нормативов качества очистки сточных вод. **Практическая значимость:** результаты наглядно показывают преобладающие тенденции современного законодательства в оценке эффективности технологий очистки городских сточных вод. Предлагаемые пути повышения эффективности очистки на городских канализационных станциях с применением наилучших доступных технологий позволяют предотвращать негативное влияние сбрасываемых очищенных сточных вод на окружающую среду. Представленные технологические схемы городских очистных сооружений позволяют достигать концентраций загрязняющих веществ в очищенных стоках, соответствующих современным требованиям.

Ключевые слова: городские сточные воды, методы очистки, наилучшие доступные технологии, комплексное экологическое разрешение, программа повышения экологической эффективности

Введение

Системы водоотведения с водоочистными сооружениями в городах России начали появляться на рубеже XIX–XX веков. Одновремен-

но обустроивались и канализационные сети, решались вопросы очистки сточных вод. Однако представление о необходимой, достаточной и достижимой степени очистки бытовых

стоков от городских поселений менялось с течением времени.

На протяжении всей истории развития приоритетной задачей очистки бытовых сточных вод было предотвращение негативного влияния очищенных стоков на поверхностный водный объект. С увеличением и углублением знаний о процессах, происходящих в водных объектах, о составе и качестве загрязняющих веществ в стоках изменялись подходы к методам и технологиям, применяемым для очистки бытовых сточных вод.

В начале XX века основная задача очистки городских сточных вод была санитарно-гигиеническая, но к середине прошлого века добавилась и на данный момент является главной природоохранная роль. Нерешенность вопросов очистки сточных вод на конкретных существующих очистных сооружениях приводит к формированию экологических проблем для всего поверхностного водоема.

Современное законодательство по оценке эффективности технологий очистки городских сточных вод

Современное российское законодательство по охране поверхностных водоемов на-

чиная с 2002 года регламентируется законом № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [1]. Концентрации загрязняющих веществ в очищенных бытовых сточных водах должны быть снижены до такой степени, чтобы при сбросе в поверхностный водоем обязательно выполнялись:

- нормативные значения, соответствующие наилучшим доступным технологиям (НДТ) [2] для городских канализационных станций, отнесенных к I категории негативного воздействия на окружающую среду;
- нормативные значения, соответствующие допустимым сбросам (НДС) [3, 4] для городских канализационных станций, отнесенных ко II категории негативного воздействия на окружающую среду.

Для анализа и сопоставления численных значений допустимых концентраций загрязняющих веществ в табл. 1 и 2 представлены технологические показатели и основные нормативы качества воды водных объектов, действительные на данный момент. Численное значение технологических показателей одновременно зависит и от производительности городской канализационной станции, и от того, к какому виду по современной классификации

ТАБЛИЦА 1. Технологические показатели в бытовых сточных водах, сбрасываемых в поверхностные водоемы, относящиеся к категории Б

Наименование показателя	Технологические показатели (среднегодовые значения концентрации загрязняющих веществ в городских сточных водах, сбрасываемых в водные объекты), не более мг/л		
	Сверхмалые очистные сооружения (до 100 м ³ /сут.)	Малые — средние очистные сооружения (101–10 000 м ³ /сут.)	Большие — сверхкрупные очистные сооружения (10 001 — свыше 600 000 м ³ /сут.)
Взвешенные вещества	15	15	10
ХПК	80	80	80
БПК ₅	12	10	8
Азот аммонийный	8	1,5	1
Азот нитратов	18	12	9
Азот нитритов	0,25	0,25	0,1
Фосфор фосфатов	5	1	0,2

ТАБЛИЦА 2. Показатели качества воды поверхностных водоемов

Наименование показателя	Вода поверхностных водоисточников [3]		Водоемы рыбохозяйственного значения [4]	
	для централизованного водоснабжения населения и хозяйственно-бытового водопользования	для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест	высшая и I категория	II категория
Увеличение содержания взвешенных веществ в воде водного объекта после выпуска в него сточных вод	Не должно превышать 0,25 мг/л	Не должно превышать 0,75 мг/л	Не должно превышать 0,25 мг/л	Не должно превышать 0,75 мг/л
ХПК	Не должно превышать 15,0 мгО ₂ /дм ³	Не должно превышать 30,0 мгО ₂ /дм ³	Не нормируется	
БПК ₅	Не должно превышать 2 мг/дм ³	Не должно превышать 4 мг/дм ³	Не должно превышать 2,1 мг/дм ³	
Растворенный кислород	Не должен быть менее 4 мг/дм ³		Не должен быть менее 6 мг/дм ³	Не должен быть менее 4 мг/дм ³

относится поверхностный водоем. Очевидно, что допустимые сбросы определяются и рассчитываются исходя из того, к какой группе по виду водопользования относится поверхностный водоем.

В области очистки стоков к объектам I категории согласно [5] относятся очистные станции, обрабатывающие более 20 тыс. м³ сточных вод в сутки, а ко второй категории — объекты с меньшим сбросом. Современная классификация поверхностных водоемов с учетом их экологических особенностей была принята в 2019 году [6]:

- к категории А относятся водоемы, обычно полностью или частично находящиеся на территории заповедников или заказников;
- к категории Б в Северо-Западном регионе — поверхностные водоемы, примыкающие или относящиеся к Балтийскому морю;
- к категории В относятся водоемы, не причисленные к категориям А и Б;
- к категории Г относятся водоемы, не причисленные к категориям А, Б, В, при этом содержание форм азота в воде не превышает 0,5 мг/л, а соединений фосфора — 0,05 мг/л.

Если поверхностный водоем используется полностью или частично для различных целей водопотребителей, то при расчете устанавливается наиболее жесткий норматив качества воды.

Станции очистки сточных вод, относящиеся к I категории, до 1 января 2025 года для продолжения своей деятельности должны подать заявку, которая обычно является многостраничным сложным документом, на получение *комплексного экологического разрешения (КЭР)*. В последующем решение о соответствии технологических процессов, осуществляемых на предприятии, наилучшим доступным технологиям и в целом об экологической безопасности производства принимается на основе выполнения КЭР.

Представленные загрязняющие вещества и их требуемые концентрации являются основой для подбора технологии очистки бытовых стоков на современном этапе развития представлений о достаточности степени их очистки.

При анализе данных, представленных в табл. 1 и 2, становится очевидно, что технологические показатели НДТ являются обоснованными, более достижимыми

и реалистичными нормами очистки сточных вод. Основным критерием оценки эффективности работы городских канализационных станций является соответствие максимальной фактической концентрации загрязняющего вещества в стоках требованиям наилучших доступных технологий.

Вместе с этим необходимо учитывать, что с 1 сентября 2024 года согласно новой редакции Закона № 7-ФЗ начало действовать правило, касающееся загрязняющих веществ I и II классов опасности, к которым должно применяться наименьшее по нормативам значение.

Правила выдачи и отзыва КЭР территориальным органом Росприроднадзора представлены и утверждены постановлением Правительства РФ [7]. Получать данное разрешение необходимо каждые 7 лет.

Результаты и обсуждения

Для своевременного получения КЭР необходимо, во-первых, изучить опубликованные информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям в разрезе используемых на производстве технологий

очистки канализационных стоков и обработки образующегося осадка. Для городских канализационных станций основным справочником является детально проработанный, описывающий и наилучшие технологии, и соответствующие им устройства, механизмы и сооружения ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» [8], в котором также представлены перечни технологических показателей и маркерных загрязняющих веществ.

Во-вторых, необходимо актуализировать или заново провести инвентаризацию источников выбросов, сбросов и отходов. В ходе инвентаризации сбросов оценивается состав сточных вод для выявления загрязняющих веществ, концентрации которых превышают ПДК.

Следующим шагом необходимо сравнить фактическое значение концентрации загрязняющих веществ со значениями технологических показателей НДТ. Только в случае превышения рассчитанных технологических нормативов по отношению к технологическим показателям в состав КЭР включается

ТАБЛИЦА 3. График поэтапного снижения концентрации загрязняющих веществ Северной станции аэрации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

Наименование загрязняющих веществ	Фактическое среднегодовое значение концентрации загрязняющего вещества, мг/л	Фактическое максимальное значение концентрации загрязняющего вещества, мг/л	Планируемое значение после реконструкции блока механической и биологической очистки, мг/л	Планируемое значение после введения блока доочистки и блока обеззараживания, мг/л	Нормативные показатели, соответствующие наилучшим доступным технологиям [2], не более мг/л
Взвешенные вещества	6,98	46	18	10	10
БПК ₅	7,3	14	11	8	8
Азот аммонийный	5,27	13,1	1,55	1	1
Азот нитратов	5,41	12,4	9,04	9	9
Азот нитритов	0,53	1,5	0,11	0,1	0,1
Фосфор фосфатов	0,36	1	0,3	0,2	0,2

Программа повышения экологической эффективности. В качестве примера в табл. 3 приведен график поэтапного снижения концентрации загрязняющих веществ Северной станции аэрации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

Первой сверхкрупной очистной станцией в Российской Федерации, которая получила КЭР и перешла на технологическое нормирование летом 2023 года, стала Центральная станция аэрации ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

После получения комплексного экологического разрешения на основные стационарные источники выбросов или сбросов загрязняющих веществ на предприятии устанавливаются системы, позволяющие в автоматическом режиме измерять и фиксировать концентрации загрязняющих веществ как в выбросах в атмосферу, так и в очищенных канализационных стоках.

Многолетний опыт проектирования и эксплуатации очистных сооружений как в нашей стране, так и за рубежом нашел отражение в современном законодательстве таким образом, что обязательными являются четыре этапа очистки бытовых сточных вод. В обязательном к исполнению на этапах проектирования и эксплуатации очистных сооружений документе подчеркнуто [9], что при любой производительности станции очистки и любой категории водоема независимо от отнесения его к тому или иному виду должны применяться этапы очистки, обеспечивающие:

- снижение концентрации нерастворенных загрязнений — механический метод очистки;
- снижение концентрации органических загрязнений — биологический метод очистки;
- полное уничтожение или достаточное снижение концентрации болезнетворных микроорганизмов и вирусов — обеззараживание;
- снижение влажности осадков (более 20%) — обезвоживание осадков.

Выбор конкретного устройства или сооружения независимо от того, к какому этапу очистки оно относится, должен основываться на выполнении общей цели, то есть обеспечении минимизации негативного воздействия всего предприятия на окружающую среду. Само сооружение очистки должно соответствовать требованиям эффективности снижения концентрации загрязнения в стоках и обозначаться в реестре НДТ как одно из возможных наилучших устройств.

Технологическая схема городских канализационных станций, представленная на рис. 1а, позволяет выполнить основные требования при сбросе бытовых стоков в поверхностный водоем категорий Б–Г. С применением в качестве сооружений биологической очистки обычных аэротенков схема, как правило, позволяет снизить концентрацию по БПК₂₀ до 10–15 мг/л, что соответствует 8–11 мг/л по БПК₅ (коэффициент пересчета принимается равным 1,33). Одновременно надо учитывать, что для достижения технологических нормативов по соединениям азота (см. табл. 1) обычный аэротенк уже не может применяться. В качестве сооружения биологической очистки предпочтительно применять аэротенки для глубокого удаления биогенных элементов — аэротенки с реализацией процессов нитри-денитрификации (биоблок), которые позволяют снизить данные концентрации до значений технологических показателей НДТ.

Для выполнения современных нормативов по снижению концентраций различных форм фосфора общепринятой практикой является дополнительная доочистка от соединений фосфора реагентным методом. Введение реагентов (солей железа, алюминия и извести) возможно в различных местах обработки как воды, так и осадка. В данной схеме представлено введение реагента в лоток или в трубопровод перед

вторичными отстойниками, где он поступает в камеру реакции и сжатым воздухом смешивается со сточной водой в течение 1–2 минут.

Для достижения целевых значений фактических максимальных значений концентраций различных форм азота и фосфора в очищенных бытовых сточных водах в первую очередь производят реконструкцию блока биологической очистки городской канализационной станции.

Выбор способа обеззараживания зависит от производительности и от того, новое или

реконструируемое сооружение очистки сточных вод. Для станций производительностью от 10–200 000 м³/сут допускается обеззараживание хлором только при осуществлении последующего обязательного дехлорирования со снижением концентрации хлора менее 0,2 г/м³, что и выполняется в схеме, представленной на рис. 1а.

К обязательным стадиям технологической схемы очистки городских сточных вод относятся и обезвоживание образующихся осадков.

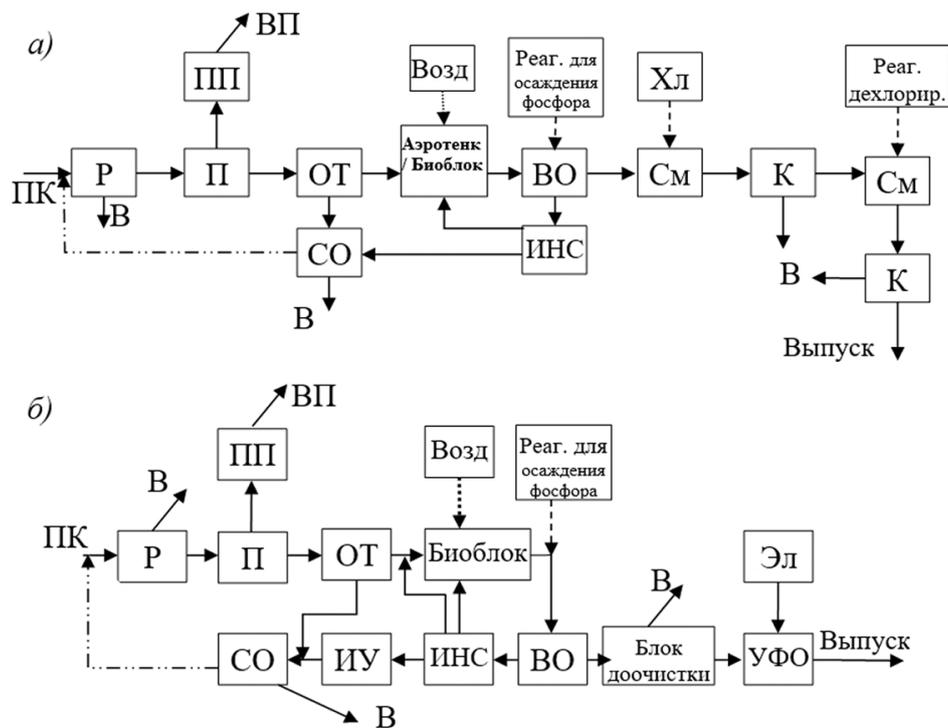


Рис. 1. Технологические схемы очистки городских сточных вод: а — полная биологическая очистка с обеззараживанием хлором с последующим дехлорированием при сбросе в водоемы категории Б–Г;

б — полная биологическая очистка с доочисткой при сбросе в водоем категории А.

Р — здание решеток; П — песколовки, сооружения для удаления минеральных взвешенных веществ; ПП — песковые площадки или бункеры для осуществления процесса обезвоживания песка; ВП — вывоз песка; ОТ — отстойники первичные; А — аэротенки обычные или биоблок для глубокого удаления азота и фосфора; Возд — воздуходувная станция; ВО — вторичные отстойники; СО — сооружения для обезвоживания осадка; Хл — хлораторная; См — смеситель сточной воды с хлором или дехлорирующим реагентом; К — контактный резервуар; Реаг — реагентное хозяйство; В — выпуск (удаление) осадка; ИНС — иловая насосная станция; ИУ — илоуплотнитель; Выпуск — выпуск очищенных стоков в водный объект

Осадки характеризуются большой влажностью (свыше 95 %), следовательно, при их уплотнении и обезвоживании даже на 20% образуются высококонцентрированные стоки, которые также подлежат очистке путем направления их в начало цепочки очистных сооружений без или после предварительной очистки [10].

Технологическая схема, представленная на рис. 16, позволяет выполнить основные требования к очищаемым городским стокам при сбросе в поверхностный водоем к категории А:

- Если производительность городской канализационной станции превышает 10 тыс. м³/сут., то взвешенные вещества должны быть в концентрации не более 5 мг/л и БПК₅ не более 3 мг/л [2]. Таким образом, полной биологической очисткой, представленной в варианте на рис. 1а, данных значений не достигнуть, и требуется доочистка от взвешенных веществ, а также от ХПК и БПК₅ [11, 12]. В качестве доочистки, в первую очередь для снижения концентрации взвешенных веществ менее 5 мг/л, рекомендуется применять сооружения, относящиеся к механическому методу, такие как барабанные сетки, микрофильтры и фильтры.

- Достаточное снижение концентраций различных форм азота и фосфора должно производиться на этапе биологической очистки с применением схем глубокого удаления соединений азота и фосфора [8, 9]. В случае несоответствия концентраций биогенных веществ в очищенных стоках технологическим нормативам, особенно по соединениям фосфора, обычно применяют реагентное осаждение этих веществ.

- Для водоемов категории А согласно [9] обеззараживание возможно осуществлять только с помощью установок ультрафиолетового излучения.

Для выполнения технологических показателей НДТ наибольшее внимание следует обращать на правильно подобранные, рассчи-

танные и надежно работающие сооружения биологической очистки [13] и устройства для обеззараживания стоков.

В настоящий момент, например, для небольших расходов (до 100 м³/сут.) и большой неравномерности поступления стоков применение мембранных биореакторов [14, 15] позволяет отказаться от вторичных отстойников, сооружений обработки активного ила, а при выборе определенных видов мембран — даже от обеззараживания. Схема очистки в мембранном биореакторе позволяет поддерживать постоянную концентрацию на выпуске: взвешенных веществ — до 3 мг/л, БПК — менее 3 мг/л, азота общего — менее 5 мг/л, а общего фосфора — менее 0,5 мг/л, что позволяет сбрасывать очищенные стоки в водоемы высшей категории А.

Заключение

Большое количество различных нормативных документов об оценке эффективности технологий очистки городских сточных вод, которые актуальны в Российской Федерации на данный момент, указывает на то, что именно сейчас происходит оттачивание механизма нормативного регулирования как эксплуатации, так и оценки эффективности работы городских канализационных очистных станций.

Подготовка материалов, выполнение исследований и расчетов для получения КЭР позволяют в каждой конкретной ситуации соотнести вред, наносимый предприятием окружающей среде, и возможность использования современных технологий по минимизации негативного воздействия как на водный источник, так и на атмосферный воздух.

Получение КЭР станцией очистки городских сточных вод позволяет выработать комплексную программу на ближайшие годы, которая при достаточном финансировании

и планомерном выполнении повышает эффективность работы отдельных сооружений всей станции в целом, а также обеспечивает достижение целевых концентраций всего спектра загрязняющих веществ.

Библиографический список

1. Об охране окружающей среды: федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 20.08.2024).
2. Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов: постановление Правительства РФ от 15.09.2020 № 1430 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565798086> (дата обращения: 20.08.2024).
3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lyh385ice0647155951> (дата обращения: 20.08.2024).
4. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 № 552 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения: 20.08.2024).
5. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий: постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2398 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854> (дата обращения: 20.08.2024).
6. Об утверждении Правил отнесения водных объектов к категориям водных объектов для целей установления технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов: постановление Правительства РФ от 26.10.2019 № 1379 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/56363625> (дата обращения: 20.08.2024).
7. О порядке рассмотрения заявок на получение комплексных экологических разрешений, выдачи, переоформления, пересмотра, отзыва комплексных экологических разрешений и внесения в них изменений: постановление Правительства РФ от 04.08.2022 № 1386 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351439814> (дата обращения: 20.08.2024).
8. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889> (дата обращения: 20.08.2024).
9. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения: 20.08.2024).
10. Технология обработки и утилизации осадков природных и сточных вод: учебное пособие / В.Г. Иванов [и др.]. СПб., 2016. 81 с.
11. Короткова Ю.Д., Твардовская Н.В. Доочистка городских сточных вод // Новые достижения в области водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сборник статей Междуна-

науч.-практ. конф., посвящ. 210-летию со дня основания Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 года) / отв. за вып. О. Г. Капинос. СПб.: ПГУПС, 2021. С. 154–158.

12. Твардовская Н. В., Максимова Е. В. Доочистка биологически очищенных сточных вод // Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сборник статей Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 10 декабря 2015 года) / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. СПб.: ПГУПС, 2016. С. 168–171.

13. Парамонова Л. Н. Пути повышения эффективности очистки сточных вод // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 2. С. 324–331.

14. Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А. Использование мембранных технологий в процессах глубокой очистки городских сточных вод // Инновации и инвестиции. 2017. № 11. С. 175–178.

15. Азаров К. И., Капинос О. Г. Применение мембранных биореакторов в сложных климатических условиях // Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сборник трудов X Междунар. науч.-практ. конф. в продолжение традиционных Академических чтений РААСН, основанных академиком РААСН В. С. Дикаревским. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. С. 104–108.

Дата поступления: 04.09.2024

Решение о публикации: 01.10.2024

Контактная информация:

КАПИНОС Ольга Геннадьевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; olk1975@mail.ru

ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»; tvardovskaya@pgups.ru

Criteria for assessing the effectiveness of urban wastewater treatment technologies in accordance with current legislation

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaya

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

For citation: *Kapinos O. G., Tvardovskaya N. V.* Criteria for assessing the effectiveness of urban wastewater treatment technologies in accordance with current legislation // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 891–901. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-891-901

Abstract

Purpose: to identify the evaluation criteria and the main ways to improve the efficiency of urban wastewater treatment technology. To present the necessary mandatory minimum stages of wastewater treatment, ensuring the protection of surface water bodies from pollutants. To substantiate the choice of technological schemes of urban sewage treatment plants of different capacities in accordance with the current regulations. **Methods:** a comprehensive analysis and systematisation of existing legal norms in

the field of domestic wastewater treatment and the impact of treated water discharge on the ecological condition of surface water bodies. Comparison and analysis of the impact of individual facilities on the operation of the technological chain of the municipal sewage plant was carried out. **Results:** modern criteria for assessing the performance of municipal sewage plants, which are one of the main direct polluters of the environment according to modern legal norms, are considered. Four interconnected, sequential and obligatory stages of domestic wastewater treatment, which should be applied at plants of any capacity, are presented. The relationship between obtaining a comprehensive environmental permit and establishing, justifying an environmental performance improvement programme for an urban sewage treatment plant and their impact on improving the efficiency and reliability of the treatment plant is shown. Specific devices and facilities modernisation and/or reconstruction of which allows to reach modern standards of sewage treatment quality most effectively and step by step. **Practical significance:** the results clearly show the prevailing trends of modern legislation in assessing the effectiveness of urban wastewater treatment technologies. The proposed ways to improve the efficiency of treatment at urban sewage treatment plants using the best available technologies allow to prevent the negative impact of discharged treated wastewater on the environment. The presented technological schemes of urban wastewater treatment plants allow achieving concentrations of pollutants in treated wastewater that meet modern requirements.

Keywords: urban wastewater, treatment methods, best available technologies, integrated environmental permit, environmental efficiency programme

References

1. Ob ohrane okruzhayushchej sredy: feder. zakon ot 10.01.2002 No. 7-FZ // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)
2. Ob utverzhdenii tekhnologicheskikh pokazatelej nailuchshih dostupnyh tekhnologij v sfere ochistki stochnyh vod s ispol'zovaniem centralizovannyh sistem vodootvedeniya poselenij ili gorodskih okrugov: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15.09.2020 No. 1430 // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565798086> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)
3. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lyh385ice0647155951> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)
4. Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnyh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshchestv v vodah vodnyh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya: prikaz Ministerstva sel'skogo hozyajstva RF ot 13.12.2016 No. 552 // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)
5. Ob utverzhdenii kriteriev otneseniya ob'ektov, okazyvayushchih negativnoe vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredyu, k ob'ektam I, II, III i IV kategorij: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 31.12.2020 No. 2398 // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)
6. Ob utverzhdenii Pravil otneseniya vodnyh ob'ektov k kategoriyam vodnyh ob'ektov dlya celej ustanovleniya tekhnologicheskikh pokazatelej nailuchshih dostupnyh tekhnologij v sfere ochistki stochnyh vod s ispol'zovaniem centralizovannyh sistem vodootvedeniya poselenij ili gorodskih okrugov: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 26.10.2019 No. 1379 // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/56363625> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)

7. O poryadke rassmotreniya zayavok na poluchenie kompleksnyh ekologicheskikh razreshenij, vydachi, pereformleniya, peresmotra, otzyva kompleksnyh ekologicheskikh razreshenij i vneseniya v nih izmenenij: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 04.08.2022 No. 1386 // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351439814> (data obrashcheniya: 20.08.2024).
8. ITS 10-2019. Ochistka stochnyh vod s ispol'zovaniem centralizovannyh sistem vodootvedeniya poselenij, gorodskih okrugov // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)
9. SP 32.13330.2018. Kanalizaciya. Naruzhnye seti i sooruzheniya // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (data obrashcheniya: 20.08.2024). (In Russian)
10. Tekhnologiya obrabotki i utilizacii osadkov prirodnyh i stochnyh vod: uchebnoe posobie / V. G. Ivanov [i dr.]. SPb., 2016. 81 s. (In Russian)
11. Korotkova Yu. D., Tvardovskaya N. V. Doochistka gorodskih stochnyh vod // Novye dostizheniya v oblasti vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i ohrany vodnyh resursov: sbornik statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 210-letiyu so dnya osnovaniya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I (Sankt-Peterburg, 13–15 noyabrya 2019 goda) / otv. za vyp. O. G. Kapinos. SPb.: PGUPS, 2021. S. 154–158.
12. Tvardovskaya N. V., Maksimova E. V. Doochistka biologicheski ochishchennyh stochnyh vod // Novye dostizheniya v oblasti vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i ohrany vodnyh resursov: sbornik statej Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 10 dekabrya 2015 goda) / Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. SPb.: PGUPS, 2016. S. 168–171. (In Russian)
13. Paramonova L. N. Puti povysheniya effektivnosti ochistki stochnyh vod // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, vyp. 2. S. 324–331. (In Russian)
14. Mishukov B. G., Solov'eva E. A. Ispol'zovanie membrannyh tekhnologij v processah glubokoj ochistki gorodskih stochnyh vod // Innovacii i investicii. 2017. No. 11. S. 175–178. (In Russian)
15. Azarov K. I., Kapinos O. G. Primenenie membrannyh bioreaktorov v slozhnyh klimaticheskikh usloviyah // Novye dostizheniya v oblasti vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i ohrany vodnyh resursov: sbornik trudov X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v prodolzhenie tradicionnyh Akademicheskikh chtenij RAASN, osnovannyh akademikom RAASN V. S. Dikarevskim. SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya asociaciya vysshih uchebnyh zavedenij, 2023. S. 104–108. (In Russian)

Received: 04.09.2024

Accepted: 01.10.2024

Author's information:

Olga G. KAPINOS — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the 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 625.032.3

Анализ предпосылок создания математической модели функционирования автосцепок груженых тяговых агрегатов

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

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

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т.Л., Риполь-Сарагоси Л. Ф., Яицков И.А. Анализ предпосылок создания математической модели функционирования автосцепок груженых тяговых агрегатов. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908

Аннотация

Цель: рассмотрены вопросы, связанные с повышением безопасности перевозки угля в связи с увеличением спроса на энергоносители в мире, ростом потенциала экспорта в дружественные страны. Одним из основных направлений обеспечения безопасности перевозочного процесса является повышение надежности функционирования автосцепных устройств тяговых агрегатов и моторных думпкаров, а также возникающих в них продольно-динамических реакций. Рассмотрены предпосылки создания математической модели движения тягового агрегата с учетом факторов, влияющих на возникновение этих усилий. Проведен анализ предпосылок для создания математической модели, позволяющей определить условия обеспечения безопасности перевозочного процесса в части недопущения разрыва автосцепок груженых тяговых агрегатов, думпкаров, а также возможного эффекта «набегания» (выдавливания вагонов). **Методика:** для составления математической модели подвижной единицы, достаточно точно отражающей наиболее важные особенности динамического процесса, обычно пользуются одномассовой моделью. **Методы:** при решении задачи определения сил, действующих на подвижной состав, предлагается рассмотреть движение карьерного поезда как системы дискретных масс в лагранжевых координатах в зависимости от времени t и начальных координат таких масс. **Практическая значимость:** обоснована необходимость расчета возникающих продольно-динамических реакций в автосцепных устройствах тяговых агрегатов в связи с увеличением уклонов и скоростей движения.

Ключевые слова: угольная промышленность, тяговый агрегат, моторный думпкар, продольно-динамические реакции

Введение

В условиях потребности в энергоносителях, поставляемых Россией в дружественные страны, вырос спрос на экспорт угля. Последние 10 лет стали для угольной промышленности этапом стабильного развития, который совпал с восстановительным ростом экономики страны в условиях санкционного давления. За этот период объем добычи российского угля вырос более чем

в 1,3 раза и сейчас превышает 440 млн т в год.

В настоящее время угольная промышленность представлена 58 шахтами и 133 разрезами. Доля России в международной торговле углем за 10 лет увеличилась с 9 до 15 %. Российские угольные компании осваивают рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона, прежде всего Республики Корея, Китайской

Народной Республики, Тайваня (КНР), Республики Индия, Малайзии и Социалистической Республики Вьетнам.

Оценка потенциальной доли России на угольных рынках основных стран-импортеров произведена исходя из возможностей наращивания поставок российского угля в абсолютное большинство стран, например, Республику Индонезия, которая на протяжении последних лет увеличивает эти закупки. Оценки основываются на информации о планах по наращиванию производства продукции черной металлургии и интенсивному развитию угольной генерации в этих регионах. Стабильная и бесперебойная доставка угля стала возможной благодаря реализации обеспечивающих инфраструктурных проектов долгосрочной программы развития ОАО «Российские железные дороги», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 года № 466-р [1, 2, 3].

Вывоз добытого угля из разрезов горно-обогатительных комбинатов осуществляется тяговыми агрегатами и думпкарами (самопрокидывающимися вагонами) по железнодорожным путям угледобывающих предприятий [4, 5], а впоследствии — магистральными локомотивами по путям общего пользования к месту перевалки. По мере роста выработки породы и увеличения перепадов высот (уклонов), а также длины и веса составов увеличивается нагрузка на автосцепные устройства. Кроме того, рельеф, по которому проложены железнодорожные магистрали общего пользования на полигонах Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока, также имеет значительный перепад высот [6], влияющий на продольно-динамические реакции, возникающие в автосцепных устройствах подвижного состава.

Дифференциальные уравнения движения поезда

Одним из основных вопросов, возникающих при изучении продольной динамики поезда, является выбор математической модели подвижной единицы, достаточно точно отражающей наиболее важные особенности динамического процесса. При решении задачи определения действующих на подвижной состав сил обычно пользуются одномассовой моделью.

Движение карьерного поезда как системы дискретных масс рассмотрим в координатах Лагранжа в функции времени t и начальной координаты этих масс. Такое описание движения поезда позволяет непосредственно сравнивать результаты теоретического исследования с экспериментальными данными (значениями скоростей, деформаций, усилий и ускорений, измеряемых в сечениях поезда в различные моменты времени) [7, 8, 9].

Рассмотрим поезд, движущийся по участку пути, профиль которого известен и задан как простая кривая в пространстве:

$$y = y(x), z = z(x). \quad (1)$$

Силы, действующие на единицу подвижного состава, движущегося по этому профилю, изображены на рис. 1 и в уравнениях (2) (см. ниже).

Уравнения (2) допускают значительные упрощения, если ввести некоторые разумные допущения о профиле пути и характере действующих на экипажи сил:

1. Подробную информацию о профиле пути, которая предполагалась известной выше, получить затруднительно. В целях упрощения расчетов профиль пути спрямляют.

2. Ввиду малых скоростей движения возвышение в кривых наружного рельса над внутренним не учитываем.

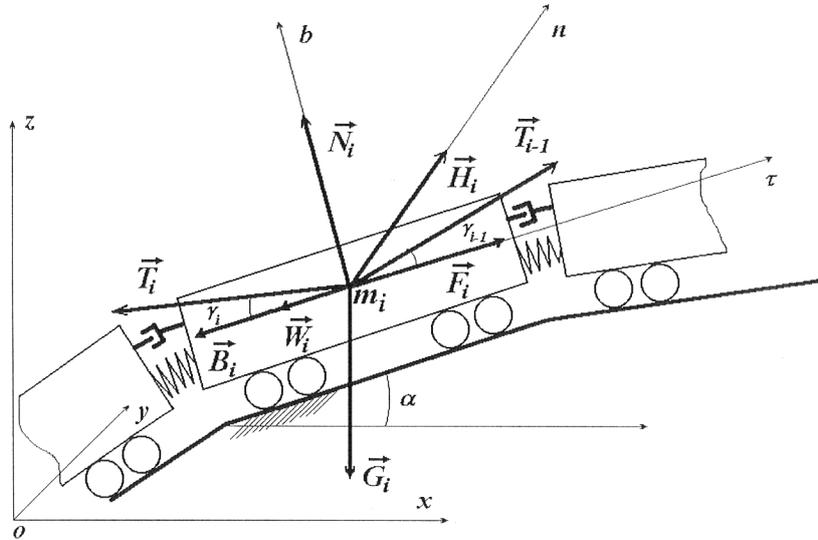


Рис. 1. Силы, действующие на единицу подвижного состава: G_i — вес подвижной единицы; N_i — нормальная реакция рельсов; H_i — боковая реакция рельсов; W_i — сила сопротивления движению; B_i — тормозная сила экипажа; F_i — сила тяги экипажа; T_i, T_{i-1} — межвагонные силы

$$\left. \begin{aligned} m_i \frac{d^2 S_i}{dt^2} &= F_i - W_i - B_i - G_i \cos(\vec{G}_{2i}, -\tau) + T_{i-1} \cos(\vec{T}_{i-1}, \tau) - T_i \cos(\vec{T}_i, -\tau); \\ m_i \frac{V_i^2}{\rho_i} &= H_i + G_i \cos(\vec{G}_{2i}, n) + T_{i-1} \cos(\vec{T}_{i-1}, n) + T_i \cos(\vec{T}_i, n); \\ 0 &= N_i - G_i \cos(\vec{G}_{2i}, -b) + T_{i-1} \cos(\vec{T}_{i-1}, b) + T_i \cos(\vec{T}_i, b); \end{aligned} \right\} \quad i = \overline{1, N} \quad (2)$$

где S_i — дуговая координата центра масс i -го экипажа, отсчитываемая от начального положения на профиле в сторону возрастания x_i ;
 $V_i = \dot{S}_i$ — алгебраическая величина скорости центра масс;
 $k_i, \rho_i = 1 / k_i$ — кривизна и радиус кривизны профиля пути.

3. Кривизну на отдельных участках принимаем постоянной, равной $k_v = 1 / \rho_v$, где ρ_v — радиус закругления на v -м участке.

Число спрямленных участков обозначим n_y , поэтому $v = 1, n_y$.

4. Углы γ_i и γ_{i-1} между касательной и силами T_i и T_{i-1} малы и оказывают слабое влияние на продольную динамику поезда, поэтому полагаем:

$$\sin \gamma_i = \gamma_i, \sin \gamma_{i-1} \cong \gamma_{i-1}, \cos \gamma_i = \cos \gamma_{i-1} \cong 1.$$

5. Угол наклона профиля пути к горизонту в точке профиля, где находится экипаж с номером i , обозначим через a_i . Предполагаем, что для профиля известна зависимость $a = a(\sigma)$. Так как уклоны пути не превышают 100%, то углы a_i можно отнести к малым и принять:

$$\cos a_i \cong 1, \sin a_i \cong a_i.$$

Сделанные предположения позволяют значительно упростить систему уравнений (2). Положив $\cos(\vec{T}_i, b) = \cos(\vec{T}_{i-1}, b) = 0$ и

$\cos(\overline{G}_i, -b) = 1$, последнее уравнение системы (2) можно заменить одним:

$$0 = N_i - G_i.$$

В системе уравнений (2), по существу, дифференциальным является только первое уравнение, а последующие — алгебраическими и позволяющими определить боковую реакцию рельсов H_i . Однако боковая реакция рельсов не влияет в данной постановке на продольную динамику поезда и может вообще не определяться. Таким образом, система уравнений записывается в виде:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{S}_i = T_{i-1} - T_i + F_i - W_i - \\ - B_i - G_{2i} \alpha_i; i = \overline{1, N} \end{aligned} \quad (3)$$

Отсчет дуговых координат $S_i (i = \overline{1, N})$ производится от положения статического равновесия, когда межвагонные связи не деформированы и установлены так, что относительные перемещения масс равны нулю.

Текущая дуговая координата масс экипажа под номером i в неподвижной системе координат, начало которой совпадает при $t = 0$ с центром масс последнего экипажа и с точкой на профиле, соответствующей $x = 0$, определяется как:

$$\sigma_i = L_i^{XB} + S_i, \quad i = \overline{1, N},$$

где L_i^{XB} — расстояние от центра масс i -го экипажа до центра масс последнего вагона в положении статического равновесия.

Учитывая это, определим:

$$L_i^{XB} = \sum_{k=1}^N l_k - (l_N + l_i) / 2, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где l_k — длина экипажа по осям сцепления автосцепок.

Для уточнения математической модели карьерного поезда необходимо учесть энергию вращающихся масс [10–12]. Колесная пара со всеми элементами и связанный с ней через редуктор с передаточным отношением k_i^* якорь

тяговых двигателей (только для электровоза управления и моторных думпкаров) создают дополнительную силу инерции, учитываемую следующим образом:

$$F_{Bi}^C = M_{Bi}^C \frac{d\omega_i}{dt} \cdot \frac{1}{R_i},$$

где M_{Bi}^C — момент сил инерции вращающихся частей;

R_i — радиус колеса по кругу катания.

Учитывая, что $d\omega_i / dt = dV_{2i} / dt \cdot 1 / R_i$, получаем:

$$\begin{aligned} F_{Bi}^C = \left[(\int \rho_{ki}^2 dm_k + (k_i^*)^2 \times \right. \\ \left. \times \int \rho_{IIIi}^2 dm_{III} \right) dV_{2i} / dt \Big] / R_i^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение в скобках в формуле (5) имеет размерность массы, следовательно, формулу можно записать следующим образом:

$$F_{Bi}^C = m_{Bi} \cdot dV_{2i} / dt,$$

где m_{Bi} — динамическая масса вращающихся частей.

В уравнениях движения поезда динамическая масса вращающихся частей m_{Bi} может быть учтена через коэффициент инерции вращающихся масс:

$$K_i^{II} = 1 + \frac{m_{Bi}}{m_{2i}}.$$

Поскольку величины продольных сил в межвагонных связях и силы, действующие на вагон, зависят от относительных перемещений и скоростей последовательно соединенных масс [13], то переходят от системы уравнений для абсолютных перемещений (3) к системе уравнений для относительных перемещений. Однако абсолютные перемещения и скорости в случае исследования динамики поездов также необходимы, ведь от этих величин зависят внешние силы, действующие на экипажи, и другие факторы, влияющие на характер

движения поезда. Поэтому более естественно непосредственно решать уравнения (3) в абсолютных перемещениях и скоростях, а относительные перемещения и скорости получать попутно в процессе решения.

Понизим порядок системы дифференциальных уравнений (3) и запишем полученную систему (6):

$$\dot{S}_i = V_i \text{ и } C_i = 1/m_i, \text{ где}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_i &= V_i; \\ \dot{V}_i &= C_i(T_{i-1} - T_i + F_i - W_i - \\ &\quad - B_i - G_i \alpha_i / K_i^H) \end{aligned} \right\} i = \overline{1, N} \quad (6)$$

Выводы

1. Предлагаемая тема научного исследования представляет интерес и является востребованной.

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

3. Снижение рисков разрыва автосцепных устройств позволит повысить экономический эффект от наращивания перевозок угля железнодорожным транспортом.

4. Представляется целесообразным рассмотреть модель движения поезда иными методами математического моделирования с целью получения объективной картины и возможности сравнения результатов расчетов различных режимов напряжения, возникающих в автосцепных устройствах, с результатами данного математического моделирования.

5. В дальнейшем для составления общей математической модели представляется целесообразным использовать полученную систему из $2N$ дифференциальных уравнений первого порядка.

Библиографический список

1. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 № 1582-р (ред. от 13.10.2022). URL: <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf>
2. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р. URL: https://ar2019.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_long-term-development-programme.pdf
3. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы»: постановление Правительства РФ от 20.12.2017 № 1596. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/841/events/>
4. Электромагнитный рельсовый тормоз: патент № RU 2216471 С2 Российская Федерация, МПК В61Н7/08. № 2001100437/28 / Л.В. Балон, В.А. Соломин, Л.Ф. Риполь-Сарагоси; заявл. 05.01.2001, опубл. 20.11.2003.
5. Электромагнитный рельсовый тормоз: патент № RU 2361761 С1 Российская Федерация, МПК В61Н7/08. № 2008104744/11 / Л.В. Балон, В.А. Соломин, Т.Л. Риполь-Сарагоси; заявл. 07.02.2008, опубл. 20.07.2009.
6. Рекомендация по техническим требованиям к магниторельсовому тормозу: памятка ОСЖД NP 546.1976.
7. Kunevich A.V., Podol'skii A.V., Sidorov I.N. Ferrites. Encyclopaedic guide. Part I. Magnets and magnet assemblies (in Russian). St. Petersburg: Lik Publishing, 2004.
8. Риполь-Сарагоси Т.Л., Риполь-Сарагоси Л.Ф. Исследование влияния температурного режима катушки на время включения электромагнитного рельсового тормоза (ЭМРТ) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3(87). С. 35–43.

9. Kitanov S., Podolskiy A. Analysis of eddy-current and magnetic rail brakes for high-speed trains // The open transportation journal. 2008. № 2. P. 19–28.
10. Автосцепка СА-3Т для вагонов тяжеловесного движения: особенности конструкции и технологии изготовления / Р. А. Савушкин [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. 2018. № 1(53). С. 30–32.
11. ГОСТ 22703–2012. Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия (с изменением № 1, с поправкой). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095718>
12. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2016. 57 с.
13. Ромен Ю. С., Мугинштейн Л. А., Неверова Л. И. Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 3(46). С. 64–68.
- Дата поступления: 29.08.2024
Решение о публикации: 05.10.2024
- Контактная информация:**
РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — докт. техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте»; ripol-saragosi@mail.ru
РИПОЛЬ-САРАГОСИ Леонид Францискович — канд. техн. наук., доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; el.siete.07@mail.ru
ЯИЦКОВ Иван Анатольевич – докт. техн. наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; yia@rgips.ru

Analysis of the prerequisites for the creation of a mathematical model of the functioning of automatic couplings of loaded traction units

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

Rostov State Transport University, 2, Square of the Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostovon-Don, 344038, Russia

For citation: *Ripol-Saragosi T. L., Ripol-Saragosi L. F., Yaitskov I. A.* Analysis of the prerequisites for the creation of a mathematical model of the functioning of automatic couplings of loaded traction units. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 902–908. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908

Abstract

Purpose: the article considers issues related to improving the safety of coal transportation due to the increasing demand for energy resources in the world and the growth of export potential to friendly countries. One of the main areas of ensuring the safety of the transportation process is to improve the reliability of the automatic coupling devices of traction units and motor dump cars, and the longitudinal-dynamic reactions that occur in them. The article considers the prerequisites for creating a mathematical model of the traction unit motion, taking into account the factors that influence the occurrence of these forces. Analyzed the prerequisites for creating a mathematical model that allows determining the conditions for ensuring the safety of the transportation process in terms of preventing the rupture of automatic couplings of loaded traction units, dump cars, as well as the possible effect of “running up” (squeezing out cars). **Methodology:** to compile a mathematical model of a moving unit that accurately reflects the most important features of the dynamic process, a single-mass model is usually used. **Methods:** when solving the problem of determining the forces acting on the rolling stock, it is proposed to consider the motion of a quarry train as a system of discrete masses in Lagrange coordinates as a function of time t and the initial coordinate of these masses. **Practical**

significance: the need to calculate the arising longitudinal-dynamic reactions in the automatic coupling devices of traction units in connection with the increase in slopes and speeds of movement is substantiated.

Keywords: coal industry, traction unit, motor dump car, longitudinal-dynamic reactions

References

1. Ob utverzhdenii Programmy razvitiya ugol'noj promyshlennosti Rossii na period do 2035 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 13.06.2020 No. 1582-r (red. ot 13.10.2022). URL: <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf> (In Russian)
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO "RZHD" do 2025 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19.03.2019 No. 466-r. URL: https://ar2019.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_long-term-development-programme.pdf (In Russian)
3. Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii "Razvitie transportnoj sistemy": postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20.12.2017 No. 1596. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/841/events/> (In Russian)
4. Elektromagnitnyj rel'sovyy tormoz: patent No. RU 2216471 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK B61H7/08. No. 2001100437/28 / L.V. Balon, V.A. Solomin, T.L. Ripol'-Saragosi; zayavl. 05.01.2001, opubl. 20.11.2003. (In Russian)
5. Elektromagnitnyj rel'sovyy tormoz: patent No. RU 2361761 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK B61H7/08. No. 2008104744/11 / L.V. Balon, V.A. Solomin, L.F. Ripol'-Saragosi; zayavl. 07.02.2008, opubl. 20.07.2009. (In Russian)
6. Rekomendaciya po tekhnicheskim trebovaniyam k magnitrel'sovomu tormozu: pamyatka OSZHD NP 546.1976. (In Russian)
7. Kunevich A.V., Podol'skii A.V., Sidorov I.N. Ferrites. Encyclopaedic guide. Part I. Magnets and magnet assemblies (in Russian). St. Petersburg: Lik Publishing, 2004.
8. Ripol'-Saragosi T.L., Ripol'-Saragosi L.F. Issledovanie vliyaniya temperaturnogo rezhima katushki na vremya vklyucheniya elektromagnitnogo rel'sovogo tormoza (EMRT) // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. No. 3(87). S. 35–43. (In Russian)
9. Kitanov S., Podolskiy A. Analysis of eddy-current and magnetic rail brakes for high-speed trains // The open transportation journal. 2008. No. 2. P. 19–28.
10. Avtoscepka SA-3T dlya vagonov tyazhe-lovesnogo dvizheniya: osobennosti konstrukcii i tekhnologii izgotovleniya / R.A. Savushkin [i dr.] // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. 2018. No. 1(53). S. 30–32. (In Russian)
11. GOST 22703–2012. Detali litye scepnyh i avtoscepnyh ustrojstv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s izmeneniem No. 1, s popravkoj). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095718> (In Russian)
12. GOST 33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. M.: Standartinform, 2016. 57 s. (In Russian)
13. Romen Yu.S., Muginshtejn L.A., Neverova L.I. Vliyanie prodol'nyh sil v poezdah na opasnost' skhoda vagonov v zavisimosti ot ih zagruzki // Transport Rossijskoj Federacii. 2013. No. 3 (46). S. 64–68. (In Russian)

Received: 29.08.2024

Accepted: 05.10.2024

Author's information:

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI —

Dr. Sci. in Engineering, Professor, Chair "Heat engineering at railway transport";

ripol-saragosi@mail.ru

Leonid F. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering, Associate Professor, Chair "Cars and car economy";

el.siete.07@mail.ru

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

Professor, Chair "Cars and car economy"; yia@rgips.ru

УДК 691.32

Учет влияния условий твердения бетона как фактор обеспечения требуемой надежности

Д. А. Черепанова

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

Для цитирования: Черепанова Д. А. Учет влияния условий твердения бетона как фактор обеспечения требуемой надежности. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 909–921. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-909-921

Аннотация

Цель: рассмотреть неучитываемые системой контроля качества бетона факторы, которые оказывают влияние на физико-механические характеристики бетона, напрямую связанные с уровнем надежности строительных конструкций, в первую очередь — влияние условий твердения бетона. Определить возможность обеспечения уровня надежности, заложенного при проектировании, при условии выполнения всех действующих требований; рассчитать степень корреляции прочности бетона с уровнем надежности и вероятностью отказа; обосновать необходимость обновления ряда подходов и принципов, заложенных в действующей нормативной документации по контролю качества бетона, а также предложить мероприятия для обеспечения соответствия фактического уровня надежности проектному. **Методы:** анализ структуры и требований действующей нормативной документации в области контроля качества бетона в целом и прочности при сжатии в частности; изготовление, испытание стандартных образцов-кубов бетона на сжатие и обработка результатов в соответствии с ГОСТ 10180, ГОСТ 18105. **Результаты:** указана необходимость изменения системы контроля качества бетона в сторону учета факторов, оказывающих влияние на обеспеченность фактической прочности бетона в конструкции вследствие ее высокой корреляции с уровнем надежности и вероятностью отказа. Рассчитаны поправочные коэффициенты для бетона с добавками и без, учитывающие условия твердения, а именно: твердение при температуре более 30 °С, при отрицательной температуре с использованием противоморозных добавок или с тепло/электропрогревом. Выявлена необходимость в создании системы поправочных коэффициентов влияния: условий твердения, выборки, стабильности, точности метода. **Практическая значимость:** использование предложенного поправочного коэффициента влияния условий среды позволит обеспечить фактическую прочность бетона в конструкции, требуемую для обеспечения проектного значения уровня надежности строительных объектов.

Ключевые слова: бетон, прочность при сжатии, класс бетона, надежность, коэффициент надежности, коэффициент запаса, коэффициент вариации прочности, вероятность отказа

Введение

Система действующей нормативной документации в области строительства [1, 2] ориентирована на обеспечение требуемого уровня надежности, который должен закладываться в процессе проектирования, обеспечиваться в процессе строительства и поддержи-

ваться в процессе эксплуатации. Надежность строительного объекта — это его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации [3]. Фундаментальные принципы теории надежности, заложенные в работах М. Майера, Н. Ф. Хоциалова,

Н.С. Стрелецкого и А.Р. Ржаницына [4, 5], по-прежнему являются основой для расчета надежности. К невозможности обеспечить требуемый уровень надежности может привести отказ, то есть состояние строительного объекта, при котором не выполняется одно или несколько условий предельных состояний. Предельное состояние характеризуется превышением характерных параметров строительного объекта, что влечет невозможность, затруднение или нецелесообразность его эксплуатации.

На этапе проектирования надежность обеспечивается в первую очередь с помощью системы коэффициентов надежности, призванных учитывать изменчивость нагрузок и вариативность свойств строительных материалов, их деградацию с течением времени, условия эксплуатации зданий и сооружений, а также тяжесть негативных последствий в случае повреждений или разрушений строительного объекта (социальных, экономических, экологических) [3, 6]. Эти коэффициенты (надежности по нагрузке, ответственности, материалу, условиям работы) должны исключить влияние неблагоприятного стечения обстоятельств и не допустить отказа или аварии.

Надежность в процессе строительства связана с качеством используемых строительных материалов, что, в свою очередь, обеспечивается качеством контроля. Основные несущие конструктивные элементы строительного объекта изготавливаются из бетона (железобетона). Соответственно, ключевым фактором для обеспечения надежности бетонных изделий и конструкций является обеспеченность физико-механических характеристик бетона, из которого они изготавливаются [7]. Основным показателем качества бетона является его прочность при сжатии. Бетон — неоднородный по

своей структуре материал, на формирование структуры которого может оказать влияние значительное количество внешних и внутренних факторов, что в итоге приведет к вариативности его прочности. Бетон делится на классы по прочности — статистической характеристике, позволяющей учитывать фактическую однородность прочности бетона и требуемый уровень обеспеченности этого параметра.

Согласно большому объему накопленных испытательными лабораториями данных о вариативности прочности бетона, она в среднем составляет 13%, а достаточным принят уровень обеспеченности, равный 0,95. Это означает, что фактическое минимальное значение прочности бетона, численно (в МПа) соответствующее значению класса, будет обеспечено минимум в 95 случаях из 100. Именно эти значения коэффициента вариации прочности бетона и обеспеченности фигурируют в действующей нормативной документации [8].

Класс бетона по прочности, как и любой нормируемый показатель качества, должен определяться по стандартизированной методике [3]. Прочность при сжатии следует из результатов испытаний специально изготовленных или отобранных из конструкции контрольных образцов по ГОСТ 10180 [9], ГОСТ 28570 [10] либо методами неразрушающего контроля непосредственного в конструкции по ГОСТ 17624 [11], ГОСТ 22690 [12], а оценку прочности осуществляют по ГОСТ 18105 [13] с учетом фактической однородности бетона по этому показателю. При контроле прочности бетона неразрушающими методами однородность прочности бетона определяют с учетом погрешности применяемых неразрушающих методов. На этом же базируется концепция надежности зданий и сооружений [3], согласно которой нормативные характеристики материалов и грунтов, а также их изменчивость

следует определять на основе результатов испытаний соответствующих образцов или методами неразрушающего контроля в соответствии с требованиями, которые обозначены в технических регламентах, стандартах, сводах правил.

Несмотря на то что методы отличаются по точности и имеют ограничения по применению, нормативно не закреплено, какой из них и в какой ситуации должен применяться. При этом в зависимости от того, какой метод используется, варьирует суммарная погрешность оценки прочности бетона, что непосредственно влияет на уровень надежности, так как возрастает вероятность пропуска брака (бетона, прочность которого не соответствует требуемой) [14]. Весьма размыты требования и к квалификации работников / уровню компетентности испытательных лабораторий, реализующих строительный контроль [15].

Далее рассмотрены основные факторы, негативное влияние которых не позволяет отследить действующая система контроля основного показателя качества бетона — прочности при сжатии.

Методы

По результатам анализа структуры и требований действующей нормативной документации, регламентирующей порядок контроля качества бетона в целом и прочности в частности, а также по результатам проведенных экспериментов выявлены следующие факторы, определяющие достоверность результатов контроля прочности бетона, влияние которых не исключается соблюдением всех установленных требований и правил:

1. Применяемые методы и схемы контроля прочности бетона не всегда обеспечивают достаточную точность, несмотря на корреляцию нормативных документов с требованиями по

обеспечению надежности в части обеспечения нормативных характеристик материалов на основе испытаний соответствующих образцов в соответствии с требованиями технических регламентов, стандартов, сводов правил [16]. Это относится как к разрушающим, так и к неразрушающим методам [12]. Первые (по контрольным образцам, по образцам, отобраным из конструкций) [9, 10] по факту являются косвенными, так как прочность образца не определяется напрямую по шкале измерительного устройства, а рассчитывается на основании значения разрушающего усилия и геометрических размеров, для которых установлены требования по допустимой погрешности. При этом погрешность косвенного измерения не рассчитывается и не учитывается. А она, согласно проведенным расчетам, суммарно может достигать 7 %, то есть почти половину от допустимой или учитываемой вариации прочности бетона в 13 % [4, 16–18]. А вторые — условно неразрушающие прямые (отрыва со скалыванием, скалывания ребра) и косвенные (метод упругого отскока, отрыва, метод пластической деформации, метод ударного импульса, ультразвуковой метод) [11, 12] — кроме того, что тоже являются косвенными за счет косвенного измерения (характеристики определяются по градуировочной шкале, построенной на основании параллельных испытаний разрушающимися методами), согласно имеющимся экспериментальным данным, могут иметь инструментальную погрешность, сильно превышающую заявленную. Данная проблема выявлена по результатам параллельных испытаний образцов бетона разных составов, испытанных разными методами. При отходе от «классического состава» бетона и его твердении в условиях, отличных от нормальных, несколькими неразрушающими методами контроля получена прочность, отличающаяся от кубиковой

почти на 38 %. Более подробно результаты изложены в [19].

2. Существующая система не исключает возможный пропуск локальных дефектов прочности. Причин этого достаточно много:

- при контроле поставщиком выборка из всего объема бетонной смеси средней поставляемой партии объемом 50 м³ составляет максимум 0,02 м³ (шесть стандартных образцов-кубов размером 150 × 150 × 150 см), что составляет всего 0,04 %, то есть «проблемной» может оказаться та часть партии, которая не попала в выборку, и в дальнейшем именно она может попасть в наиболее опасный участок конструкции [17];

- контроль по образцам, отобраным из конструкции, не всегда информативен, так как образцы зачастую отбираются не из самых опасных для работы конструкции мест, а с точки зрения удобства и безопасности испытаний, к тому же качество выбуривания кернов и/или их обработка могут значительно повлиять на результат испытания;

- неразрушающие методы оценки прочности имеют ряд ограничений по их применению, то есть объем выборки для испытания ограничен частью конструкции, подходящей в качестве базы для испытаний (например, отсутствие дефектов поверхности, арматуры для ультразвукового контроля, контроль только поверхностного слоя при использовании метода отрыва со скалыванием и др.) [20];

- разрушающий контроль по образцам, твердевшим в идентичных условиях, учитывает не все факторы, оказавшие влияние на бетон конструкции, к тому же он возможен только для строящихся объектов.

То же касается и пропуска локальных дефектов прочности. Статистический подход при контроле, который является основой на-

дежности, реализуется в недостаточном объеме. Например:

- по результатам испытаний среднее значение прочности при сжатии может «сгладиться» за счет отбрасывания одного (для серии из трех или четырех стандартных образцов) и двух (для серии из шести образцов) минимальных результатов испытаний, что предусмотрено методикой [9] (предполагается, что отклонение прочности вызвано не качеством бетона, а пониженным качеством изготовления и испытания образцов);

- минимальное значение единичных значений прочности образцов в испытываемой партии, которое по установленным требованиям должно быть численно не ниже значения класса, является «усредненным»: не учитывает стабильность производства, объем выборки (количество испытываемых образцов), то есть не отражает риск-ориентированный подход.

Подробное обоснование с использованием статистического метода приемочного контроля качества по количественному признаку для нормального закона распределения представлено в [21]. О неприменимости критериев соответствия прочности бетона, установленных в действующей нормативной документации, для малых производственных объемов говорится и в [22].

3. Влияние условий твердения. Это один из наиболее важных параметров, которые необходимо учитывать. И делать это необходимо заблаговременно, то есть еще на этапе проектирования, а также при планировании проведения работ. Экспериментально подтверждено, что соблюдение правил ухода за бетоном не гарантирует обеспечения проектного значения прочности. Результаты проведенного исследования подробно представлены далее.

Для оценки эффективности мероприятий по уходу за бетоном как фактора исключения

негативного влияния на прочность бетона условий твердения, отличающихся от нормальных, были изготовлены две партии бетона: первая – бетон «классического состава» проектного класса В30 (без добавок); вторая — бетон с добавками (микрокремнеземом, расход 29,25 кг/м³) и пластификатором (Sika Sikament BV-3V, расход в соответствии с указаниями производителя) проектного класса В40. Данные о составах представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Данные о составах бетона

Материал	Расход материалов	
	В30	В40
Цемент (М500 ЦЕМ1 42,5Н), кг/м ³	450,0	450
Песок, кг/м ³	760,0	930
Щебень, кг/м ³	1140,0	700
Вода, кг/м ³	233,0	247

Из каждой партии бетона изготовлены стандартные образцы-кубы по ГОСТ 10180, которые были разделены на группы и помещены в условия, имитирующие твердение при температуре более 30 °С — ГР2; твердение при отрицательных температурах с прогревом без введения противоморозной добавки — ГР3; твердение при отрицательных температурах с введением противоморозной добавки (Sika Antifreeze FS-1) — ГР7. Также из каждой партии была изготовлена контрольная группа образцов, которые твердели в нормальных условиях, — ГР1. При твердении образцов соблюдались все правила ухода за бетоном в соответствующих условиях [23].

Перед определением прочности при сжатии в возрасте 28 суток, которое осуществлялось с соблюдением всех правил, определенных в ГОСТ 10180, образцы были испытаны на водонепроницаемость (способность бетона сопротивляться прохождению через его струк-

туру воды под давлением, которая напрямую связана с плотностью и прочностью) ускоренным методом по воздухопроницаемости [24] с помощью устройства для определения водонепроницаемости бетона ВВ-2.

Результаты

Данные о полученных значениях прочности образцов партии классического бетона (без добавок) проектного класса В30 представлены на рис. 1, партии бетона с добавками проектного класса В40 — на рис. 2.

Несмотря на то что, судя по результатам полученной прочности в возрасте 28 суток, на бетон без добавок условия среды не оказали негативного влияния, данные о результатах испытания партии бетона с добавками наглядно демонстрируют, что уход за бетоном не всегда способен обеспечить требуемую (заложенную при проектировании) прочность бетона, что влечет риски как для организатора строительства, так и для непосредственных пользователей готового объекта.

Данные о водонепроницаемости образцов (о марке по водонепроницаемости и среднем времени) партии классического бетона (без добавок) проектного класса В30 представлены на рис. 3, партии бетона с добавками проектного класса В40 — на рис. 4.

Представленные экспериментальные данные наглядно демонстрируют, что даже при сохранении прочности в проектном возрасте (бетон партии № 1, рис. 1) может существенно снижаться водонепроницаемость, что, в свою очередь, свидетельствует о наличии дефектов структуры, которые в начальный момент времени могут и не оказать влияние на физико-механические характеристики бетона, но со временем окажут влияние на долговечность и надежность конструкции, так как в том числе карбонизация бетона

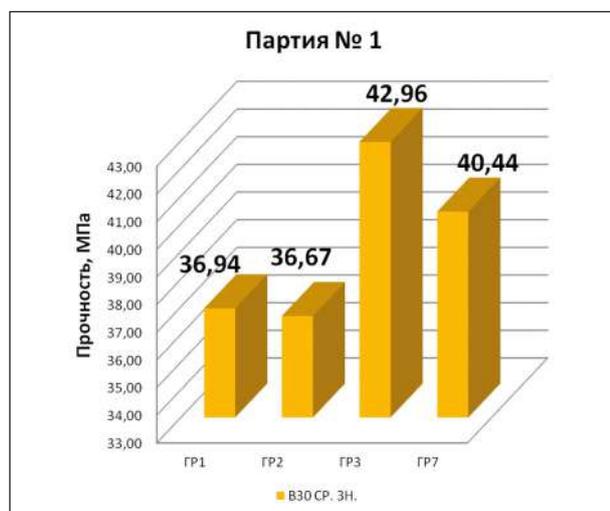


Рис. 1. Прочность образцов партии бетона без добавок

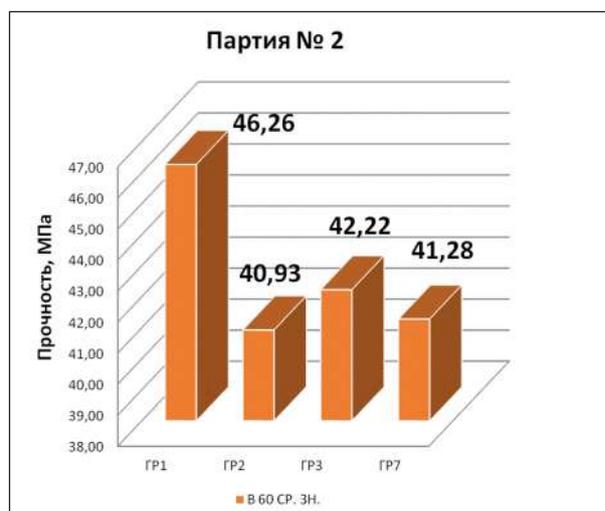


Рис. 2. Прочность образцов партии бетона с добавками

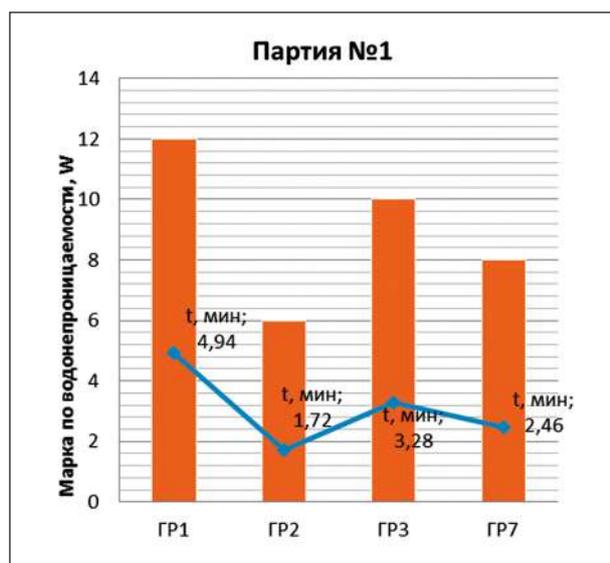


Рис. 3. Данные о водонепроницаемости партии бетона без добавок

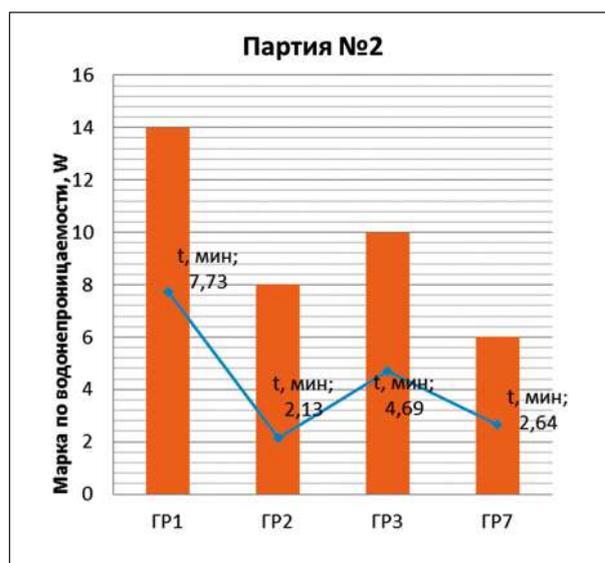


Рис. 4. Данные о водонепроницаемости партии бетона с добавками

и его последующее разрушение будут происходить значительно быстрее.

Все это приводит к тому, что значение минимальной прочности для класса смещается, появляется значение В'. Вероятность принятия брака из-за снижения фактического уровня обеспеченности прочности до уровня В' наглядно продемонстрирована на рис. 5.

Рассмотрим, как это в итоге повлияет на коэффициент запаса прочности $K_{зан}$ и напрямую связанный с ним уровень надежности.

Несущая способность и нагрузочный эффект будут определяться сложением случайных величин, участвующих в расчете и распределенных по нормальному закону (рис. 6).

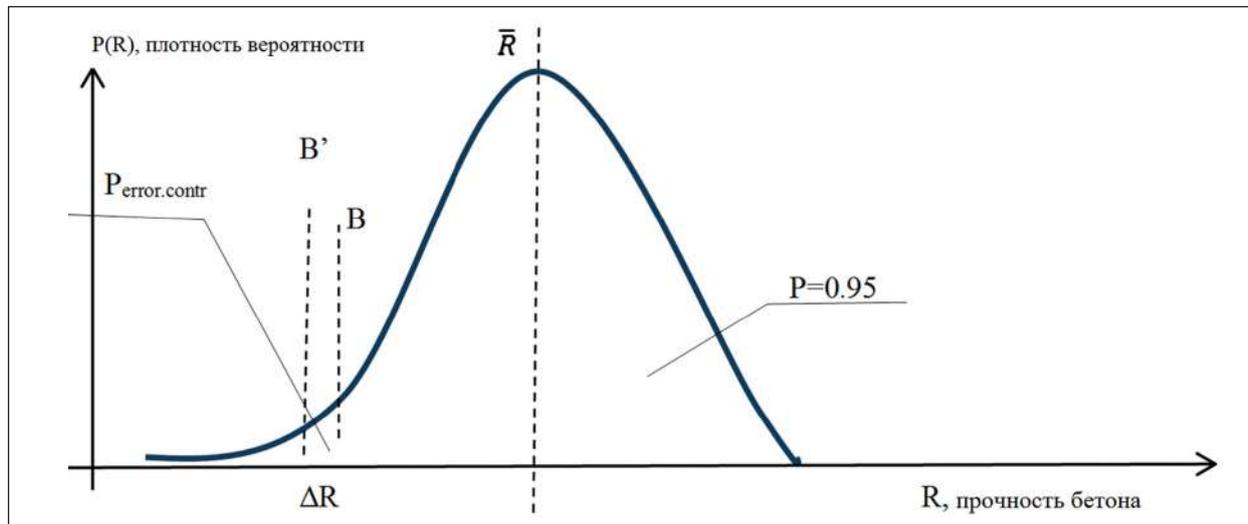


Рис. 5. Графическое представление вероятности ошибки при определении прочности из-за отсутствия наследственности показателя; ΔR — ошибка определения значения прочности; B' — предельная величина прочности, соответствующая классу бетона с учетом ошибок, пропущенных системой контроля

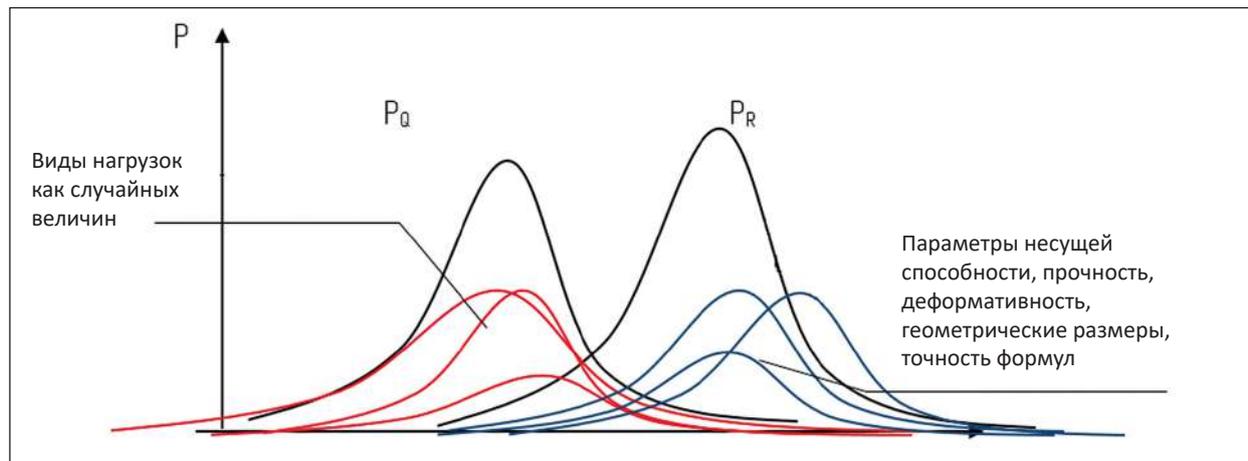


Рис. 6. Сравнение несущей способности и нагрузочного эффекта как суммирующего набора случайных факторов: нагрузок, прочности, геометрических размеров и др. ($P_Q = K_{занх} P_R$)

Принципиальные положения концепции безопасности сооружения [5] сформулированы как вероятностное решение проблемы « $G = R - E$ » в предположении, что обобщенные показатели сопротивления элемента R и нагрузки E есть случайные переменные, которые имеют нормальное распределение и взаимно не коррелируют:

$$P_f = P(R - E \leq 0) = P(G \leq 0) = \Phi \left[\frac{(0 - \mu_G)}{\sigma_G} \right], \quad (1)$$

где G — резерв прочности;
 P_f — вероятность отказа;
 μ_G и σ_G — первые моменты распределения (математическое ожидание и стандартное отклонение);
 Φ — нормальная функция распределения.

Вероятностным решением проблемы стала формула для определения β — характеристики безопасности (индекса надежности):

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}. \quad (2)$$

Соответственно, вероятность отказа P_f является нормальной функцией распределения от $(-\beta)$:

$$P_f = \Phi(-\beta). \quad (3)$$

Тогда, исходя из (1) и (2), имеем:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{S_R^2 + S_Q^2}}, \quad (4)$$

где: S_R, S_Q — среднеквадратическое отклонение прочностных свойств материала и нагрузок;

или:

$$\beta = \frac{K_{зан} - 1}{\sqrt{(v_R^2 K_{зан} + v_Q^2)}}, \quad (5)$$

где: v_R, v_Q — коэффициенты вариации прочностных свойств материала и нагрузок, рассчитываемые по формулам:

$$v_Q = \frac{S_Q}{\bar{Q}}, \quad (6)$$

$$v_R = \frac{S_R}{\bar{R}}. \quad (7)$$

Тогда вероятность отказа (разрушения материала) P_f можно сформулировать в виде:

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi(\beta) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (8)$$

или

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \exp\left(\frac{-\beta^2}{2}\right), \quad (9)$$

а коэффициент запаса может быть представлен формулой:

$$K_{зан} = \frac{(2 + \beta^2 v_R^2) + \sqrt{(2 + \beta^2 v_R^2)^2 - 4(1 - \beta^2 v_Q^2)}}{2}. \quad (10)$$

Наглядно численное изменение уровня надежности β и соответствующее увеличение вероятности отказа P_f при изменении коэффициента запаса прочности с шагом в 1 % в сторону уменьшения от нормального значения до уровня 0,9 от исходного значения (то есть изменения на 10 % в сторону уменьшения) и всех связанных величин, рассчитанных по формулам (1)–(10), представлены в табл. 2.

Полученные данные подтверждают высокую корреляцию между коэффициентом запаса, уровнем надежности и вероятностью отказа соответственно: при уменьшении коэффициента запаса прочности на 10 %, индекс надежности уменьшается на 12 %, что соответствует увеличению вероятности отказа в 1,64 раза.

Используя полученные экспериментальные данные об уровне прочности в разных условиях твердения, предлагается ввести поправочный коэффициент условий твердения для нивелирования влияния негативных факторов среды, в которых бетон набирает прочность (табл. 3). Этот коэффициент необходимо учитывать при расчете требуемой прочности с учетом графика проведения работ.

Перспективным направлением развития исследования является создание системы поправочных коэффициентов для учета влияния всех факторов, рассмотренных в данной работе, с целью нивелирования влияния изменчивости прочности бетона. Предлагается ввести следующие коэффициенты:

- коэффициент условий твердения, подробно описанный ранее;
- коэффициент выборки, позволяющий учитывать объем выборки, который рассчитывается

ТАБЛИЦА 2. Изменение уровня надежности β и соответствующее увеличение вероятности отказа P_f при изменении коэффициента запаса $K_{зап}$ прочности бетона

ν_R	ν_Q	$K_{зап}$	β	P_f	Увеличение P_f , %
0,13	0,47	2,23	2,419	0,00734	–
		2,21	2,381	0,00811	9
		2,19	2,343	0,00895	18
		2,17	2,305	0,00986	26
		2,15	2,267	0,01084	32
		2,13	2,229	0,01191	38
		2,11	2,191	0,01306	44
		2,09	2,153	0,01431	49
		2,07	2,115	0,01564	53
		2,05	2,077	0,01707	57
		2,03	2,039	0,01860	61
		2,01	2,001	0,02022	64

ТАБЛИЦА 3. Коэффициент условий твердения

	Условия твердения		
	При температуре выше 30°C	При температуре ниже 0°C	При температуре ниже 0°C
Поправочный коэффициент	1,13	1,10	1,12

в том числе на базе плана выборочного контроля по количественному признаку;

- коэффициент стабильности (ответственности), позволяющий учитывать степень доверия к поставщику (стабильность производства, включая частоту отбора проб);

- коэффициент точности метода, заключающий в себе поправку, которая связана как с точностью средства измерения, так и с точностью метода в целом, и учитывающий ограниченность применения того или иного метода, уровень квалификации исполнителя испытания (испытательной лаборатории).

Выводы

Выполнения всех требований и правил, закрепленных в действующей нормативной

документации в области контроля качества бетона в целом и прочности при сжатии в частности, не всегда достаточно для обеспечения требуемого уровня надежности зданий и сооружений. Для устранения обозначенных проблем возможно действовать в двух направлениях. Первое — совершенствовать методы и методики, повышать точность испытания. Второе направление связано с проблемой отрывности испытываемых образцов от реальной конструкции. Контроль по образцам, по сути, характеризует качество компонентов, состав и качество перемешивания смеси, так как после изготовления на качество бетона могут оказать влияние такие факторы, как условия его транспортировки, технология укладки, условия твердения и др. Следовательно,

необходимо развивать методы, которые позволят контролировать бетон непосредственно в конструкции, на любом ее участке, например, альтернативным методом контроля по модулю упругости [25].

Кроме того, необходимо, чтобы система контроля закладывалась на этапе проектирования строительного объекта, включая:

- определение контрольных участков;
- определение методов, применение которых рационально на данных участках;
- разделение всех элементов конструкции по уровню ответственности по аналогии со зданиями;
- установление единых требований к квалификации работников, осуществляющих контроль, и к испытательным лабораториям.

Библиографический список

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федер. закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ // Доступ из СПС «Гарант».
2. Перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», утв. постановлением Правительства РФ от 28.05.2021 № 815.
3. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
4. Беленцов Ю.А., Харитонов А.М., Тихонов Ю.М. Оценка методов контроля прочности бетона по критерию надежности возводимых конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6(65). С. 147–151.
5. Лантух-Лященко А. И. Концепция надежности в Еврокоде // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2014. № 6. С. 79–88.
6. СП 20.13330.2016 (СНиП 2.01.07-85). Нагрузки и воздействия.
7. О надежности определения механических характеристик прочности бетона на сжатие при стандартных испытаниях / Л. М. Абрамов [и др.] // Евразийский союз ученых. 2016. № 31-1. С. 44–49.
8. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
9. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
10. ГОСТ 28570-2019. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.
11. ГОСТ 17624-2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
12. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
13. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
14. Влияние точности расчетных моделей и формул на результаты определения несущей способности конструкций / Ю. А. Беленцов [и др.] // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 5(1053). С. 50–53.
15. Аналитическая справка по вопросу об обязанности лиц, осуществляющих строительный контроль, быть членами саморегулируемых организаций, об определении уровня ответственности таких лиц по обязательствам, а также о субсидиарной ответственности саморегулируемой организации за неисполнение или ненадлежащее исполнение членом саморегулируемой организации обязательств по договорам строительного контроля, утв. Научно-консультативной комиссией (протокол от 14.05.2021 № 12) Ассоциации «Национальное объединение строителей» (НОСТРОЙ). URL: <https://nostroy.ru/dokumenty>
16. Возможность пропустить бракованные изделия из бетона с учетом точности контроля / Ю. А. Беленцов [и др.] // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 5.
17. Комов В.М., Беленцов Ю.А., Черепанова Д.А. Статистический контроль качества бетонов

для предотвращения «локальных выбросов» прочности в объеме материала // Актуальные проблемы естественных и технических наук: сб. ст. межвуз. науч.-практ. конф. СПб., 2023. С. 234–244.

18. Черепанова Д. А. Влияние метода испытания на достоверность оценки прочности бетона при сжатии // XVII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы Всерос. научн. конф. Вологда, 2023. С. 130–134.

19. Черепанова Д. А., Беленцов Ю. А. Влияние условий твердения на прочность и водонепроницаемость бетона // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. тр. LXXXIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. С. 282–288.

20. Черепанова Д. А. Сравнительный анализ существующих методов контроля прочности бетона // Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития: сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2022. С. 249–257.

21. Черепанова Д. А. Статистический подход к установлению минимальной величины прочности

на сжатие при определении класса бетона // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4(99). С. 90–99.

22. Тур В. В., Дереченник С. С., Дереченник А. С. О применении критериев соответствия прочности бетона согласно СТБ EN 206-1-2000 // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. Минск, 2012. Вып. 4. С. 152–176.

23. СП 435.1325800.2018 Конструкции бетонные и железобетонные монолитные. Правила производства и приемки работ.

24. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.

25. Способ контроля прочности бетона: патент на изобретение RU 2815345 C1, 13.03.2024 / Ю. А. Беленцов, Д. А. Черепанова; заявл. 21.11.2023.

Дата поступления: 05.08.2024

Решение о публикации: 20.09.2024

Контактная информация:

ЧЕРЕПАНОВА Дария Алексеевна — старший преподаватель, начальник отдела качества; cherepanova@pgups.ru

Taking into account the influence of concrete hardening conditions as a factor in ensuring the required reliability

D. A. Cherepanova

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

For citation: *Cherepanova D. A.* Taking into account the influence of concrete hardening conditions as a factor in ensuring the required reliability. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 909–921. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-909-921

Abstract

Purpose: to consider factors not taken into account by the concrete quality control system that influence the physical and mechanical characteristics of concrete, directly related to the level of reliability of building structures, primarily the influence of concrete hardening conditions. Determine the possibility of ensuring

the level of reliability assumed during the design, provided that all current requirements are met; calculate the degree of correlation between the strength of concrete and the level of reliability and probability of failure; justify the need to update a number of approaches and principles laid down in the current regulatory documentation for concrete quality control, and also propose measures to ensure that the actual level of reliability corresponds to the design level. **Methods:** analysis of the structure and requirements of current regulatory documentation in the field of quality control of concrete in general and compressive strength in particular; production, testing of standard concrete cube samples for compression and processing of results in accordance with GOST 10180, GOST 18105. **Results:** the need to change the concrete quality control system towards taking into account factors influencing the actual strength of concrete in a structure due to its high correlation with the level of reliability and probability of failure is indicated. Correction factors have been calculated for concrete with and without additives, taking into account hardening conditions, namely: hardening at temperatures above 30°C, at negative temperatures using anti-freeze additives or with heat/electric heating. The need has been identified to create a system of influence correction factors: hardening conditions coefficient, sampling coefficient, stability coefficient, method accuracy coefficient. **Practical importance:** the use of the proposed correction factor for the influence of environmental conditions will ensure the actual strength of concrete in the structure required to ensure the design value of the level of reliability of construction projects.

Keywords: concrete, compressive strength, concrete class, reliability, safety factor, safety factor, strength variation coefficient, probability of failure

References

1. Tehnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij: feder. zakon ot 30.12.2009 No. 384-FZ // Dostup iz SPS «Garant».
2. Perechen' nacional'nyh standartov i svodov pravil (chastej takih standartov i svodov pravil), v rezul'tate primeneniya kotoryh na obyazatel'noj osnove obespechivaetsya soblyudenie trebovanij Federal'nogo zakona «Tehnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij», utv. postanovleniem Pravitel'stva RF ot 28.05.2021 No. 815.
3. GOST 27751-2014. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozheniya.
4. Belenczov Yu.A., Haritonov A.M., Tihonov Yu.M. Ocenka metodov kontrolya prochnosti betona po kriteriyu nadezhnosti vozvodimyh konstrukcij // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2017. No. 6(65). S. 147–151.
5. Lantuh-Lyashhenko A.I. Konceptiya nadezhnosti v Evrokode // Mosti ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktika. 2014. No. 6. S. 79–88.
6. SP 20.13330.2016 (SNiP 2.01.07-85). Nagruzki i vozdejstviya.
7. O nadezhnosti opredeleniya mehanicheskikh harakteristik prochnosti betona na szhatie pri standartnyh ispytaniyah / L. M. Abramov [i dr.] // Evrazijskij soyuz uchenyh. 2016. No. 31-1. S. 44–49.
8. SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya.
9. GOST 10180-2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazczam.
10. GOST 28570-2019. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po obrazczam, otobranym iz konstrukcij.
11. GOST 17624-2021. Betony. Ul'trazvukovoj metod opredeleniya prochnosti.
12. GOST 22690-2015. Betony. Opredelenie prochnosti mehanicheskimi metodami nerazrushayushhego kontrolya.
13. GOST 18105-2018. Betony. Pravila kontrolya i ocenki prochnosti.
14. Vliyanie tochnosti raschetnyh modelej i formul na rezul'taty opredeleniya nesushhej sposobnosti konstrukcij / Yu. A. Belenczov [i dr.] // BST: Byulleten' stroitel'noj tehniki. 2022. No. 5(1053). S. 50–53.
15. Analiticheskaya spravka po voprosu ob obyazannosti licz, osushhestvlyayushhih stroitel'nyj kontrol', byt' chlenami samoreguliruemym organizacij, ob opredelenii urovnya otvetstvennosti takih licz po

obyazatel'stvam, a takzhe o subsidiarnoj otvetstvennosti samoreguliruemoj organizacii za neispolnenie ili nenadlezhashhee ispolnenie chlenom samoreguliruemoj organizacii obyazatel'stv po dogovoram stroitel'nogo kontrolya, utv. Nauchno-konsul'tativnoj komissiej (protokol ot 14.05.2021 No. 12) Associacii "Nacional'noe obyedinenie stroitelej" (NOSTROJ). URL: <https://nostroy.ru/dokumenty>

16. Vozmozhnost' propustit' brakovannye izdeliya iz betona s uchetom tochnosti kontrolya / Yu. A. Belenczov [i dr.] // Vestnik evrazijskoj nauki. 2023. T. 15, No. 5.

17. Komov V. M., Belenczov Yu. A., Cherepanova D.A. Statisticheskij kontrol' kachestva betonov dlya predotvrashheniya "lokal'nyh vybrosov" prochnosti v obyeme materiala // Aktual'nye problemy estestvennyh i tehniceskikh nauk: sb. st. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. SPb., 2023. S. 234–244.

18. Cherepanova D.A. Vliyanie metoda ispytaniya na dostovernost' ocenki prochnosti betona pri szhatii // XVII Ezhegodnaya nauchnaya sessiya aspirantov i molodyh uchenyh: materialy Vseros. nauchn. konf. Vologda, 2023. S. 130–134.

19. Cherepanova D. A., Belenczov Yu. A. Vliyanie uslovij tverdeniya na prochnost' i vodonepronitsaemost' betona // Transport: problemy, idei, perspektivy: sb. tr. LXXXIII Vseros. nauch.-texn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh: v 2 t. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshheniya Imperatora Aleksandra I, 2023. S. 282–288.

20. Cherepanova D.A. Sravnitel'nyj analiz su-shhestvuyushhih metodov kontrolya prochnosti betona // Perspektivnye nauchnye issledovaniya: opyt, problemy i perspektivy razvitiya: sb. nauch. st. po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ufa, 2022. S. 249–257.

21. Cherepanova D.A. Statisticheskij podhod k ustanovleniyu minimal'noj velichiny prochnosti na szhatie pri opredelenii klassa betona // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2023. No. 4(99). S. 90–99.

22. Tur V.V., Derechennik S.S., Derechennik A.S. O primenenii kriteriev sootvetstviya prochnosti betona soglasno STB EN 206-1-2000 // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS; redkol.: M. F. Markovskij [i dr.]. Minsk, 2012. Vyp. 4. S. 152–176.

23. SP 435.1325800.2018 Konstrukcii betonnye i zhelezobetonnye monolitnye. Pravila proizvodstva i priemki rabot.

24. GOST 12730.5-2018. Betony. Metody opredeleniya vodonepronitsaemosti.

25. Sposob kontrolya prochnosti betona: patent na izobretenie RU 2815345 C1, 13.03.2024 / Yu. A. Belenczov, D. A. Cherepanova; zayavl. 21.11.2023.

Received: 05.08.2024

Accepted: 20.09.2024

Author's information:

Dariya Al. CHEREPANOVA — senior lecturer, head of quality department; cherepanova@pgups.ru

УДК 621.54+06

Исследование зависимости энергетической эффективности технологии адсорбционной осушки сжатого воздуха от модификации алюмогеля

Т. Л. Риполь-Сарагоси

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

Для цитирования: Риполь-Сарагоси Т. Л. Исследование зависимости энергетической эффективности технологии адсорбционной осушки сжатого воздуха от модификации алюмогеля // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 922–930. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-922-930

Аннотация

Цель: представление результатов проведенных исследований по выявлению факторов влияния на энергозатратность процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха при использовании в качестве адсорбента наиболее часто встречающихся модификаций алюмогеля при его осушке для последующего использования в пневмосистемах подвижного состава железных дорог. **Методика:** для определения энергозатратности процесса осушки сжатого воздуха при его подготовке для использования в пневмосистемах подвижного состава опробована методика расчета увеличения расхода энергии на валу электродвигателя компрессора, позволяющая оценить влияние на нее таких величин, как относительная влажность атмосферного воздуха, скорость прохождения сжатым воздухом адсорбента, высота слоя адсорбента в адсорбере, потери давления при прохождении адсорбента, его порозность, величина насыпной и кажущейся плотности, а также установить степень их влияния на энергозатратность процесса адсорбции для возможной корректировки самой методики расчета. **Методы:** использованы методы сравнения и анализа полученных результатов, а также их визуализации, которые легли в основу формирования выводов и рекомендаций по применению рассматриваемых видов алюмогеля. Установлено, какие расчетные формулы методики позволяют установить тенденцию в определении энергозатратности процесса осушки сжатого воздуха при использовании различных его видов. **Практическая значимость:** обоснована необходимость определения энергозатратности процесса осушки сжатого воздуха при использовании различных видов алюмогеля для выбора наиболее энергоэффективного варианта на стадии проектирования адсорбционной осушки. Полученные результаты при использовании аналитических выражений методики могут быть рекомендованы к практическому применению на стадии проектирования систем осушки сжатого воздуха.

Ключевые слова: сжатый воздух, адсорбция, энергоэффективность, энергозатратность, порозность, потери давления, адсорбент, алюмогели

Основной задачей любой отрасли российской промышленности сегодня является снижение затрат энергии при проведении технологических производственных процессов. Не исключение и осушка сжатого воздуха, осуществляемая для повышения безопасности, эффективности и надежности работы пневматических производственных систем, в том числе

и пневматических систем подвижного состава железных дорог Российской Федерации. Таким образом, материал статьи, посвященный определению возможностей снижения энергозатратности процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха с использованием в качестве адсорбента алюмогеля нижеописанных модификаций, является актуальным.

Общеизвестным является факт значительных энергетических затрат на реализацию процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха. При этом в работах автора [1–3] были проведены исследования по выявлению энергозатратности адсорбционной осушки сжатого воздуха не только на таких адсорбентах, как силикагель и цеолит, но и на нескольких их модификациях внутри каждого вида, отличающихся набором физических характеристик, свойственных данной модификации. Основной задачей было определение потерь давления при прохождении слоя адсорбента (его модификаций) определенной высоты и обусловленное этой потерей увеличение расхода энергии на валу локомотивного компрессора. Для такого адсорбента, как алюмогель, и четырех его наиболее используемых модификаций подобных исследований не проводилось.

Наиболее широко используемыми модификациями алюмогеля являются:

- Alumac 1,5–3 A;
- Alumac 2–5 D;
- Alumac AA-XR 101-CH;
- BASF F-200.

Выбор алюмогеля в качестве объекта исследования определяется его значительной, по сравнению с другими адсорбентами, адсорбционной поверхностью, большим объемом пор, что определило высокую адсорбционную способность данного адсорбента, высокой прочностью гранул к истиранию, а также возможностью производства его гранул в виде сфер. Это позволяет осуществлять равномер-

ную засыпку алюмогеля, что должно положительно сказаться на минимизации потерь давления при прохождении влажного сжатого воздуха через адсорбент даже при достаточно высоких скоростях его движения в адсорбере.

В табл. 1 представлены основные характеристики ранее упомянутых модификаций алюмогеля.

Основные характеристики компрессора, используемого для производства сжатого воздуха для пневмосистем электровозов производства НЭВЗ, представлены в табл. 2.

Далее согласно алгоритму, представленному в [2–8], определим величины, которые позволят рассчитать потери мощности на привод компрессора для различных видов алюмогелей с последующим их представлением в табл. 3. Актуальные параметры поступающего от компрессора в адсорбер сжатого воздуха, необходимые для определения потерь мощности на его привод, были рассчитаны при минимально возможной скорости движения 0,2 м/с, относительной влажности 50% и 3-м классе чистоты, согласно нормативному документу [9].

Основываясь на знании скоростей движения сжатого воздуха через адсорбер, изменяющихся в диапазоне от 0,2 до 0,5 м/с при изменении относительной влажности всасываемого в компрессор воздуха в диапазоне от 50 до 100%, рассчитаем энергозатратность и визуализируем результаты на гистограммах (рис. 1–4). Требуемый класс осушки сжатого воздуха соответствует нормативному документу [9].

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики исследуемых алюмогелей

Вид адсорбента	Alumac 1,5–3 A	Alumac 2–5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
Суммарный объем пор, см ³ /г	0,44	0,44	0,48...0,5	0,5
Насыпная плотность, кг/м ³	800...880	780...860	740...880	769
Влагоемкость, %	37,5	39	44	42

ТАБЛИЦА 2. Рабочие характеристики локомотивного компрессора

Компрессор ВУ-3,5/10-1450	
Тип компрессора	Поршневой
Производительность (вход/выход), л/мин	1750
Рабочее давление, бар	10
Мощность двигателя, кВт	29
КПД компрессора	0,7
КПД привода	0,8

ТАБЛИЦА 3. Потери мощности на привод компрессора для различных видов алюмогелей

Характеристика	Alumac 1,5-3 A	Alumac 2-5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
1	2	3	4	5
d_0 , г/м ³	25,336			
d_k , г/м ³	0,884			
M_a , кг	6,83	6,57	5,82	6,1
V_a , м ³	0,0085	0,0084	0,0078	0,0079
ρ_r , кг/м ³	2,88			
D , м	0,273			
H , м	0,15	0,14	0,13	0,14
ε	0,5	0,51	0,54	0,52
Δp , бар	0,029	0,029	0,028	0,028
ΔN , Вт	111,6	112,8	110,5	107,7

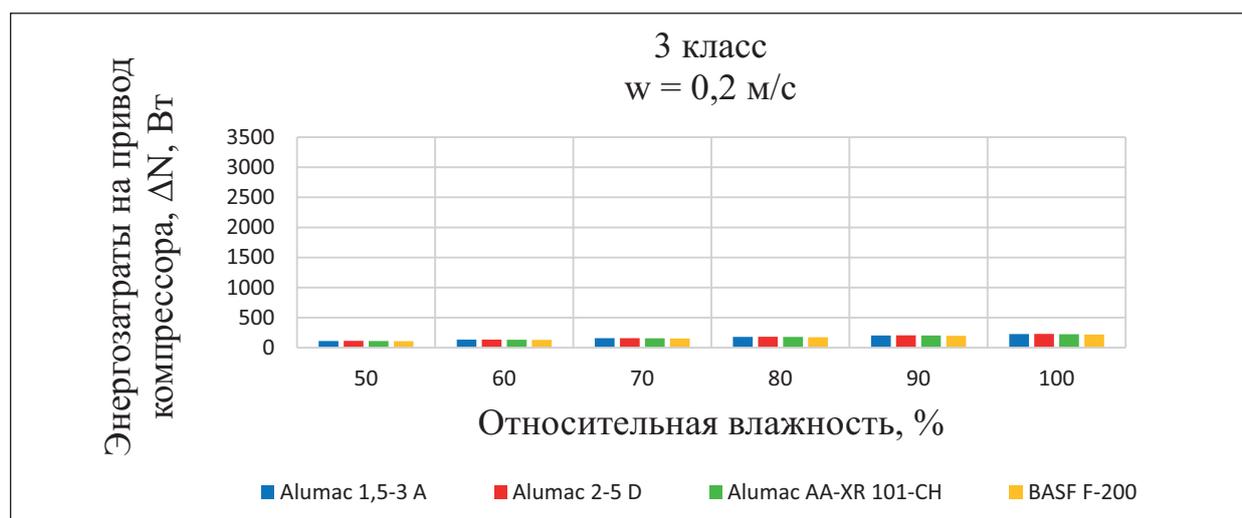


Рис. 1. Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

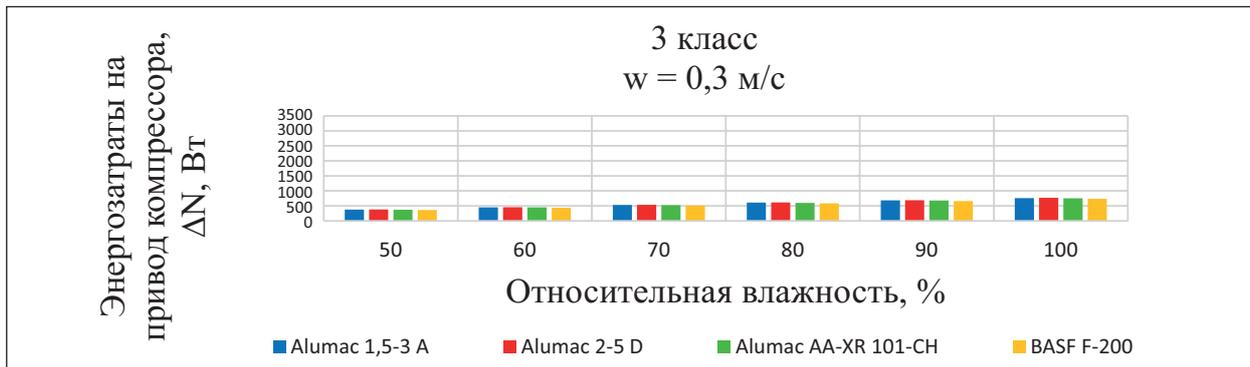


Рис. 2. Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

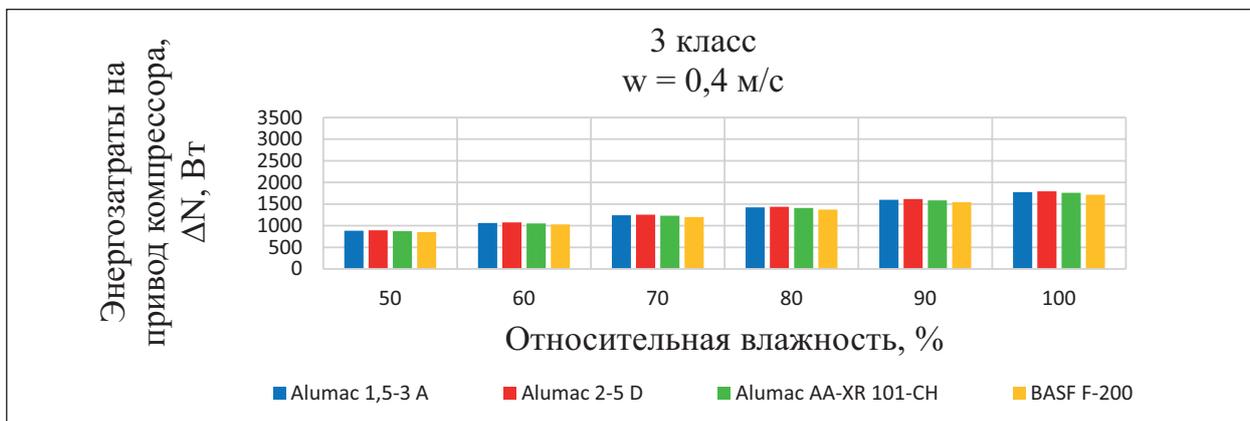


Рис. 3. Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

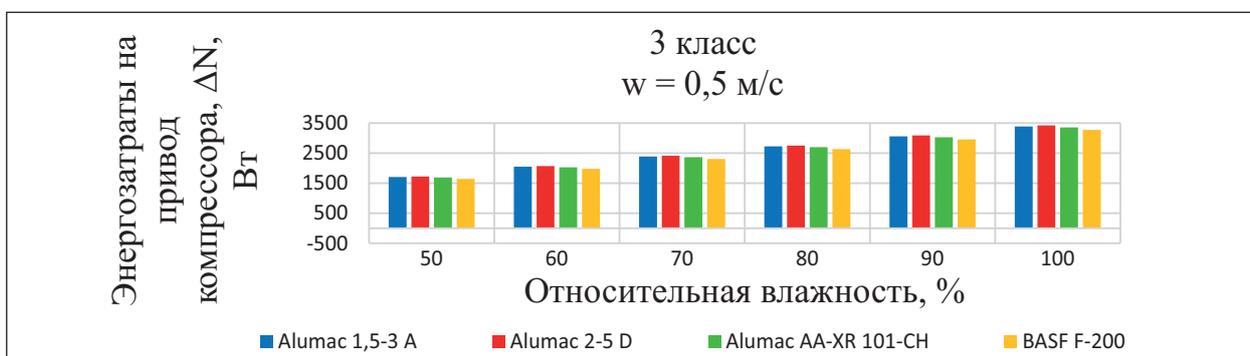


Рис. 4. Зависимость энергетических затрат на привод компрессора при реализации процесса адсорбции на различных видах алюмогеля от относительной влажности атмосферного воздуха и скорости движения сжатого воздуха

Актуальные параметры поступающего от компрессора в адсорбер сжатого воздуха, необходимые для определения потерь мощности на его привод, были рассчитаны при минимально возможной скорости движения 0,2 м/с, относительной влажности 50% и 3-м классе чистоты, согласно выбранным модификациям алюмогеля. Результаты представлены в табл. 4.

Расчет для вышеописанного режима работы компрессора показал, что разница в потерях энергии при прохождении сжатого воздуха через слой адсорбента, высота которого меняется незначительно, для наиболее энергоэффективного (BASF F-200) и наименее эффективного (Alumac 2–5 D) в представленной выборке адсорбентов составляет 4,5% за принятое расчетное время работы компрессора. Это указывает на преимущество алюмогеля BASF F-200 перед другими видами по критерию «энергоэффективность». Проведем анализ наметившихся тенденций изменения энергозатратности при адсорбции влаги из сжатого воздуха в пневмосистемах подвижного состава на четырех марках алюмогеля.

Из очевидных факторов влияния стоит отметить относительную влажность всасываемого

воздуха и скорость прохождения сжатого воздуха через слой адсорбента. Чем выше относительная влажность, тем больше энергии будет затрачиваться на осушку сжатого воздуха вне зависимости от марки алюмогеля. При этом тенденция определения наиболее и наименее энергоэффективного вида при изменении относительной влажности сжатого воздуха и скорости его движения для требуемого 3-го класса чистоты после осушки сохраняется. Это алюмогель BASF F-200 — самый энергоэффективный и Alumac 2-5 D — самый энергозатратный соответственно.

Определим в процентном отношении степень влияния энергоэффективности алюмогелей при изменении относительной влажности атмосферного воздуха. Для 3-го класса чистоты при скорости 0,2 м/с и относительной влажности 100% она составляет 4,5%. А для аналогичных значений требуемого класса чистоты и относительной влажности 100%, но при повышении скорости до 0,5 м/с энергоэффективность составит 4,4%, что говорит о сохранении величины влияния выбранных характеристик на энергоемкость процесса адсорбции в пределах одного класса чистоты. При этом если мы

ТАБЛИЦА 4. Потери мощности на привод компрессора для различных видов алюмогелей

Характеристика	Alumac 1,5–3 A	Alumac 2–5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
1	2	3	4	5
$d_0, \text{г/м}^3$	25,336			
$d_k, \text{г/м}^3$	0,884			
$M_a, \text{кг}$	6,83	6,57	5,82	6,1
$V_a, \text{м}^3$	0,0085	0,0084	0,0078	0,0079
$\rho_r, \text{кг/м}^3$	2,88			
$D, \text{м}$	0,273			
$H, \text{м}$	0,15	0,14	0,13	0,14
ε	0,5	0,51	0,54	0,52
$\Delta p, \text{бар}$	0,029	0,029	0,028	0,028
$\Delta N, \text{Вт}$	111,6	112,8	110,5	107,7

рассмотрим степень изменения энергозатрат в численном выражении, то увидим, что для 3-го класса чистоты при 100%-ной относительной влажности и скорости 0,2 м/с она составляет 93,3% как для менее энергозатратного алюмогеля, так и для более энергозатратного. Полученные расчетные данные говорят о том, что наибольшее влияние на расход энергии при проведении адсорбционных процессов осушки сжатого воздуха оказывает скорость его движения через адсорбент. Было бы неверным не учитывать влияние величины порозности адсорбента на его энергозатратность при прохождении через него сжатого воздуха. Данная зависимость была установлена с использованием алгоритма [2] и представлена на рис. 5.

Анализ представленных выше зависимостей согласуется с выявленной ранее тенденцией: энергозатратность рассматриваемых марок адсорбентов зависит от их порозности, однако эта зависимость ввиду незначительной разности в ее величинах для исследуемых видов алюмогелей не превышает 6,2% между самым большим и самым маленьким значением при использовании самого энергоэффектив-

ного и самого энергозатратного алюмогеля. Однако эта зависимость существует и должна быть учтена при формировании рекомендаций по приоритетам использования того или иного вида адсорбента в пределах одной группы. Важно, что тенденция при определении наиболее и наименее энергоэффективного адсорбента сохранена.

Таким образом, на основании представленного выше пошагового анализа факторов влияния для рассмотренных модификаций алюмогеля наиболее энергоэффективным и рекомендуемым к промышленному применению является алюмогель марки BASF F-200.

Ввиду высокой энергетической затратности адсорбционного процесса осушки сжатого воздуха и принятия более жестких требований в соответствии с нормативными документами по требуемому классу осушки сжатого воздуха для вновь выпускаемых локомотивов железнодорожного транспорта дальнейшие исследования будут направлены на изучение тенденций ее изменения для требований осушки сжатого воздуха в соответствии с 2-м и 1-м классом чистоты.

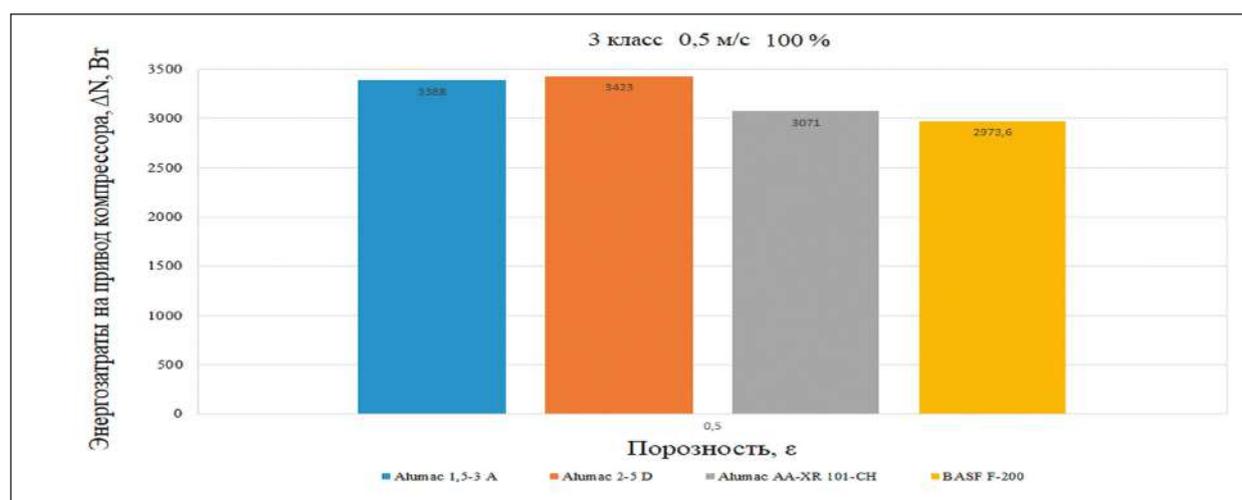


Рис. 5. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида алюмогеля и значения порозности

Библиографический список

1. Исследование возможностей снижения энергоемкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха / Т.Л. Риполь-Сарагоси [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 4. С. 187–200. DOI: 10.20295/2223–9987-2023-4-187-200. EDN JDFVAY.

2. Риполь-Сарагоси Т. Л., Риполь-Сарагоси Л.Ф. Исследование энергоэффективности процессов осушки сжатого воздуха с использованием цеолитов различных марок // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (90). С. 132–138. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_132. EDN YNVRLT.

3. Перспективы использования адсорбционных технологий для подготовки газа к транспорту / С. Ю. Кондауров [и др.] // Газовая промышленность. 2010. № 10 (651). С. 52–55. EDN MUZACF.

4. Катализатор гидроочистки, содержащий подложку, полученную из алюмогеля, и способ получения такого катализатора: патент № 2663667 С2 Российская Федерация, МПК В01J 23/24, В01J 23/74, В01J 23/82. № 2015125559 / А. Додэн, Э. Девер, М. А. Лелиа; заявл. 26.11.2013; опубл. 08.08.2018; заявитель ИФП ЭНЕРЖИ НУВЕЛЛЬ. EDN QKJVFS.

5. Сравнительные адсорбционные свойства термохимически модифицированных кремнеземных сорбентов и алюмогеля / В.П. Горшунова [и др.] //

Химия, новые материалы, химические технологии: внутривуз. сб. науч. тр. Вып. 1. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2011. С. 81–86. EDN NRSCUV.

6. Кожевникова И. В., Сафиуллина Т. Р., Зенитова Л. А. Промышленные отходы силикагеля, цеолита и алюмогеля как основная составляющая полиуретановых композиционных материалов // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. (Нижекамск, 5–7 апреля 2016 года). Нижекамск: ПАО «Нижекамскнефтехим», 2016. С. 56. EDN WIPOZP.

7. Влияние затравки на кристаллизацию α -Al₂O₃ в алюмогелях / А. В. Галахов [и др.] // Новые огнеупоры. 2014. № 2. С. 48–50. EDN RWQRED.

8. Порошки α -Al₂O₃ из аморфного алюмогеля / А. В. Галахов [и др.] // Неорганические материалы. 2015. Т. 51, № 3. 248 с. DOI: 10.7868/S0002337X15030045. EDN TGWARP.

9. ГОСТ 32202-2013. Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава.

Дата поступления: 26.06.2024

Решение о публикации: 14.09.2024

Контактная информация:

РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — докт. техн. наук, профессор; ripol-saragosi@mail.ru

Dependence study energy efficiency of adsorption drying technology of compressed air on modification of aluminogel

T. L. Ripol-Saragosi

Rostov State Transport University, 2, Square of the Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: Ripol-Saragosi T. L. Dependence study energy efficiency of adsorption drying technology of compressed air on modification of aluminogel // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 922–930. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-922-930

Abstract

Purpose: to provide the results of the conducted research to identify factors influencing the energy consumption of the process of adsorption drying of compressed air when using the most common modifications of aluminogel as an adsorbent during its drying for subsequent use in pneumatic systems of railway rolling stock. **Methodology:** to determine the energy consumption of the compressed air drying process when preparing it for use in pneumatic systems of rolling stock, a method for calculating the increase in energy consumption on the shaft of the compressor electric motor has been tested, allowing to assess the effect on it of such values as relative humidity of atmospheric air, the rate of passage of the adsorbent by compressed air, the height of the adsorbent layer in the adsorber, pressure loss during the passage of the adsorbent, its porosity, bulk and apparent density, and also to establish the degree of their influence on the energy consumption of the adsorption process for possible adjustment of the calculation method itself. **Methods:** methods of comparison and analysis of the results obtained, as well as their visualization, were used, which formed the basis for the formation of conclusions and recommendations on the use of the types of aluminum gel under consideration. It has been established which calculation formulas of the methodology allow us to establish a trend in determining the energy consumption of the compressed air drying process when using its various types. **Practical significance:** the necessity of determining the energy consumption of the compressed air drying process when using various types of aluminogel to select the most energy-efficient option at the design stage of adsorption drying is substantiated. The results obtained using analytical expressions of the methodology can be recommended for practical application at the design stage of compressed air drying systems design.

Keywords: compressed air, adsorption, energy efficiency, energy consumption, porosity, pressure losses, adsorbent, aluminogels

References

1. Issledovanie vozmozhnostej snizheniya energoemkosti adsorbcionnyh processov pri vysokih trebovaniyah k vlagosoderzhaniyu szhatogo vozduha / T.L. Ripol'-Saragosi [i dr.] // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2023. No. 4. S. 187–200. DOI: 10.20295/2223–9987-2023-4-187-200. EDN JDFVAY. (In Russian)

2. Ripol'-Saragosi T.L., Ripol'-Saragosi L. F. Issledovanie energoeffektivnosti processov osushki szhatogo vozduha s ispol'zovaniem ceolitov razlichnyh

marok // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. No. 2(90). S. 132–138. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_132. EDN YNVRLT. (In Russian)

3. Perspektivy ispol'zovaniya adsorbcionnyh tekhnologij dlya podgotovki gaza k transportu / S. Yu. Kondaurov [i dr.] // Gazovaya promyshlennost'. 2010. No. 10(651). S. 52–55. EDN MUZACF. (In Russian)

4. Katalizator gidroochistki, sodержashchij podlozhku, poluchennuyu iz alyumogelya, i sposob

polucheniya takogo katalizatora: patent No. 2663667 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK B01J 23/24, B01J 23/74, B01J 23/882. No. 2015125559 / A. Doden, E. Dever, M. A. Lelia; zayavl. 26.11.2013; opubl. 08.08.2018; zayavitel' IFP ENERZHI NUVELL'. EDN QKJVFS. (In Russian)

5. Sravnitel'nye adsorbcionnye svoystva termohimicheski modificirovannyh kremnezemnyh sorbentov i alyumogelya / V.P. Gorshunova [i dr.] // Himiya, novye materialy, himicheskie tekhnologii: vnutrivuz.sb. nauch. tr. Vyp. 1. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2011. S. 81–86. EDN NRSCUV. (In Russian)

6. Kozhevnikova I. V., Safiullina T. R., Zenitova L. A. Promyshlennye othody silikagelya, ceolita i alyumogelya kak osnovnaya sostavlyayushchaya poliuretanovyh kompozicionnyh materialov // Sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovacionnogo razvitiya neftekhimii: materialy IX Mezhdunar.nauch.-prakt. konf. (Nizhnekamsk, 5–7 aprelya 2016 goda).

Nizhnekamsk: PAO "Nizhnekamskneftekhim", 2016. S. 56. EDN WIPOZP. (In Russian)

7. Vliyanie zatravki na kristallizaciyu α -Al₂O₃ v alyumogelyah / A. V. Galahov [i dr.] // Novye ogneupory. 2014. No. 2. S. 48–50. EDN RWQRED. (In Russian)

8. Poroshki -Al₂O₃ iz amorfno alyumogelya / A. V. Galahov [i dr.] // Neorganicheskie materialy. 2015. T. 51, No. 3. S. 248. DOI: 10.7868/S0002337X15030045. EDN TGWARP. (In Russian)

9. GOST 32202-2013. Szhatyj vozduh pnevmaticheskikh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. (In Russian)

Received: 26.06.2024

Accepted: 14.09.2024

Author's information:

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering, Professor; ripol-saragosi@mail.ru

УДК 691.5

Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов

Л. Ф. Казанская¹, В. А. Майер¹, Э. С. Сибгатуллин²

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

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского федерального университета, Россия, 423812, Набережные Челны, ул. Строителей, 1

Для цитирования: Казанская Л. Ф., Майер В. А., Сибгатуллин Э. С. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21. Вып. 4. С. 931–943. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

Аннотация

Цель: показать влияние различных факторов, таких как водоцементное отношение, карбонизация, проникновение хлоридов и морозостойкость, на долговечность бетона и его способность защищать арматуру от коррозии. **Методы:** применены методы анализа и моделирования. На основе сравнительного исследования существующих данных, норм и научных публикаций рассмотрены взаимосвязи между водоцементным отношением, глубиной проникновения хлоридов, карбонизацией и морозостойкостью бетона, а также их влияние на коррозионную стойкость арматурной стали. **Результаты:** установлено, что водоцементное отношение является одним из важнейших параметров, определяющих долговечность бетона. Повышение водоцементного отношения ведет к увеличению глубины проникновения хлоридов и ускорению процессов карбонизации, что в конечном итоге снижает коррозионную стойкость арматуры и долговечность бетонных конструкций. **Практическая значимость:** в производственных условиях обеспечение долговечности бетонных конструкций требует комплексного подхода, учитывающего не только прочностные характеристики, но и широкий спектр других показателей, непосредственно влияющих на эксплуатационные свойства бетона. Для конкретных условий эксплуатации наиболее важными могут оказаться такие свойства, как морозостойкость, плотность, устойчивость к агрессивным средам и биологическим воздействиям, трещиностойкость и способность противостоять карбонизации.

Ключевые слова: долговечность бетона, водоцементное отношение, прочность, морозостойкость, плотность, устойчивость к агрессивным средам

Введение

Долговечность — это способность материала или конструкции сохранять свои физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики в течение длительного времени при воздействии различных факторов окружающей среды, таких как влага, температура, химические агенты и механические нагрузки. Долговечность бетона, например, зависит от его устойчивости к таким процессам, как

карбонизация, проникновение хлоридов, коррозия арматуры, а также его морозостойкости и устойчивости к химическим воздействиям. Долговечность измеряется количеством времени, в течение которого материал сохраняет свои функции без значительного ухудшения.

Надежность — это комплексное понятие, включающее в себя не только долговечность, но и способность конструкции или материала

безотказно выполнять свои функции в заданных условиях эксплуатации. Надежность характеризуется такими параметрами, как прочность, устойчивость к нагрузкам и внешним воздействиям, а также вероятность возникновения дефектов и повреждений. В контексте характеристик бетона надежность включает в себя как его долговечность, так и способность выдерживать заданные эксплуатационные нагрузки без разрушений или значительных повреждений.

Тогда можно считать, что долговечность является одной из составляющих надежности и отвечает за сохранность конструкциями или материалами своих свойств, а надежность включает в себя также их способность эффективно функционировать в течение этого времени и при этом не выходить из строя. Этому вопросу посвящены работы многих исследователей как конца прошлого века [1], так и в современных реалиях [2–6].

Структура бетона представляет собой сложную композитную систему, которая непрерывно трансформируется. Причем в этой системе изменения происходят независимо от того, каким качественным был бетон при его укладке. Важно понимать, что долговечность бетона тесно связана с его способностью сохранять свои эксплуатационные характеристики на протяжении всего запланированного срока службы при условии надлежащего ухода и поддержания. Это и приводит к активизации научных исследований в области обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций [7–10].

Влияние на долговечность бетона может оказываться через несколько основных механизмов: физические (например, воздействие мороза), химические (сульфатные растворы), биологические (например, бактерии) и механические (механический износ). Основное

воздействие этих факторов происходит на поверхностных участках бетонных конструкций, и их интенсивность усиливается при наличии влаги.

История строительных технологий свидетельствует о том, что забота о долговечности и надежности сооружений имеет глубокие корни, уходящие в далекое прошлое. Одним из ранних свидетельств законодательного регулирования качества строительства является Кодекс Хаммурапи, датируемый 1700 годом до нашей эры, который устанавливал строгие правила, касающиеся качества строительных сооружений, и предусматривал суровые наказания за нарушения. Жесткие меры за некачественное строительство оставались в силе вплоть до Средних веков, и это подчеркивает, что долговечность и надежность строительных сооружений всегда имели важное значение и были предметом как законодательного регулирования, так и общественной оценки.

В настоящее время требования к качеству и долговечности строительных сооружений регулируются разнообразными нормами, стандартами и положениями строительного надзора. Соблюдение этих нормативных требований позволяет обеспечить долговечность бетонных конструкций, а также минимизировать расходы на их уход и обеспечить длительный срок эксплуатации без существенного ухудшения эксплуатационных характеристик.

Методы и материалы исследования

Применены методы анализа и моделирования. На основе сравнительного исследования существующих данных, норм и научных публикаций рассмотрены взаимосвязи между водоцементным отношением, глубиной проникновения хлоридов, карбонизацией

и морозостойкостью бетона, а также их влияние на коррозионную стойкость арматурной стали.

Материалами стали бетоны на основе портландцемента ЦЕМ-I с классами прочности 32,5, 42,5 и 52,5 МПа.

Результаты

Водоцементное отношение является одним из ключевых аспектов, определяющих долговечность бетона, оно взаимосвязано со следующими факторами.

Объем пор и плотность

Плотность бетона, которая определяется объемом пор, является критическим фактором, влияющим на его долговечность. Проникновение агрессивных веществ в бетон происходит преимущественно через капиллярные поры цементного камня, поры в контактной зоне между цементным камнем и заполнителем, а также через микротрещины. Особое значение для долговечности бетона имеет область капиллярных пор размером от 10 нм до 100 мкм. Чем меньше размер и количество таких пор, тем выше плотность и, следовательно, устойчивость бетона к проникновению агрессивных веществ.

Исследования показывают, что сопротивление гелевых пор (< 10 нм) проникновению агрессивных сред чрезвычайно высоко. Для водопроницаемости цементного камня ключевыми факторами являются водоцементное отношение и степень гидратации. Как видно из рис. 1, при водоцементном отношении 0,5–0,55 и степени гидратации > 80 % водопроницаемость остается на низком уровне. Однако при увеличении водоцементного отношения до 0,5 и снижении степени гидратации до 60 %, водопроницаемость возрастает в 10 раз. В случае полного увлажнения при водоцементном отношении

0,5–0,7 водопроницаемость может увеличиться в 15 раз.

Важно понимать, что одинаковый класс прочности бетона не означает одинаковую долговечность, большую роль играет высокая плотность бетона.

Прочность при сжатии

Прочность при сжатии бетона, хотя и является важным показателем, не всегда коррелирует с его долговечностью. Бетон высокого класса прочности может быть получен при различном водоцементном отношении, что влияет на его проницаемость и, соответственно, долговечность.

На рис. 2 представлено увеличение водоцементного отношения при одинаковом классе прочности бетона.

Примером может служить бетон В25 (заданная прочность 35 Н/мм²), который можно получить с различными водоцементными отношениями:

- класс прочности цемента 32,5 — $v/c = 0,50$;
- класс прочности цемента 42,5 — $v/c = 0,62$.

Во втором случае проницаемость бетона выше в 4 раза, что делает его менее долговечным. Прочность бетона обусловлена в первую очередь цементирующими свойствами гидросиликатов кальция, образующихся при гидратации цемента.

Глубина проникновения воды

Глубина проникновения воды определяется при постоянном нахождении в воде до момента испытания. Увеличение водоцементного отношения с 0,4 до 0,6 независимо от возраста бетона ведет к увеличению глубины проникновения воды примерно в 2 раза. Этот процесс показан на рис. 3.

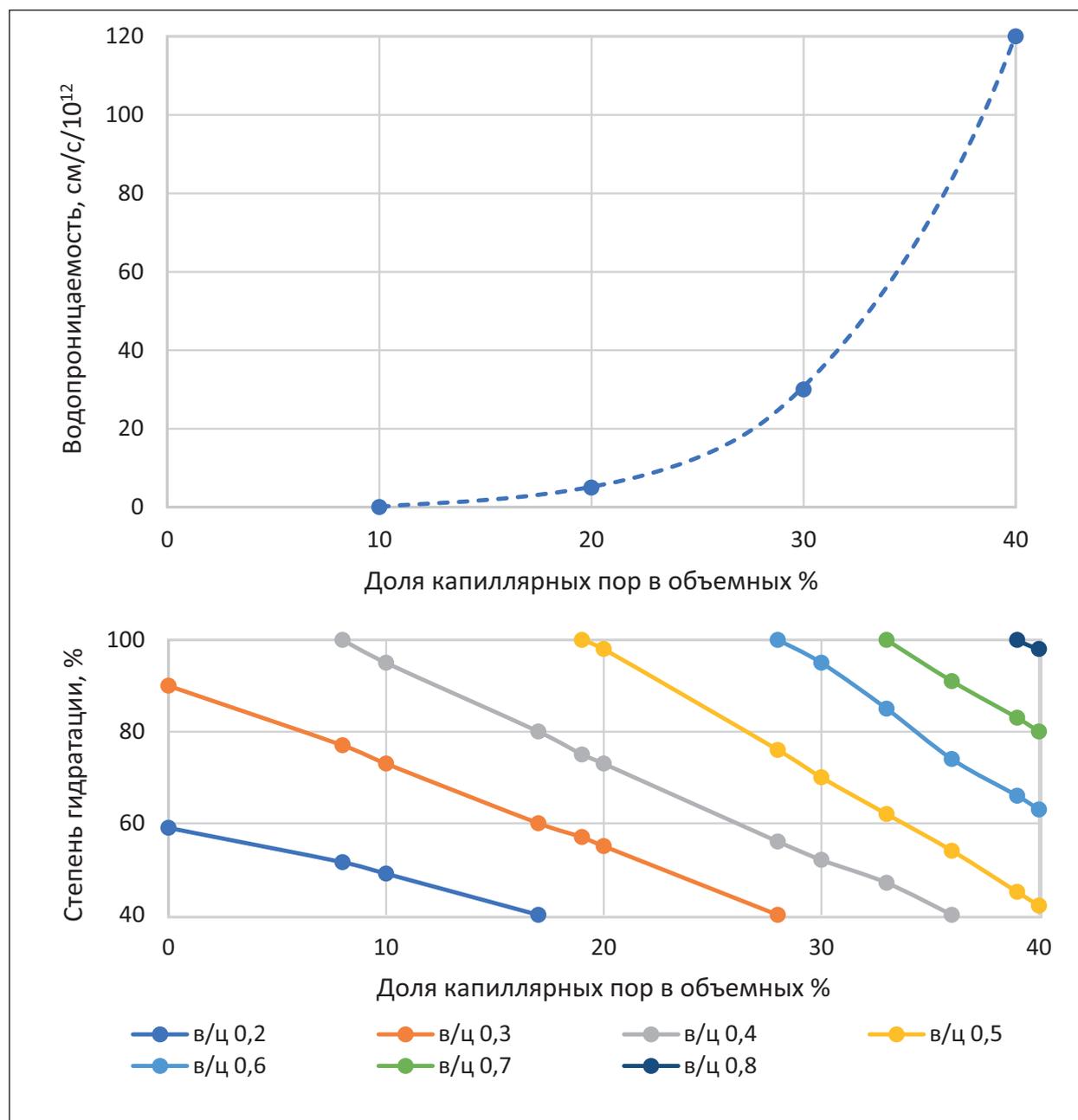


Рис. 1. Водопроницаемость цементного камня в зависимости от капиллярной пористости, водоцементного отношения и степени гидратации

Газопроницаемость

Проницаемость — это способность материала, в данном случае бетона, пропускать жидкости или газы через свою пористую структуру под воздействием внешнего давления. Проникновение происходит через сеть пор

и трещин, которые образуются в результате различных факторов.

Газопроницаемость является важным критерием, определяющим защищенность арматуры от коррозии. Чем меньше газопроницаемость бетона, тем выше его сопротивление

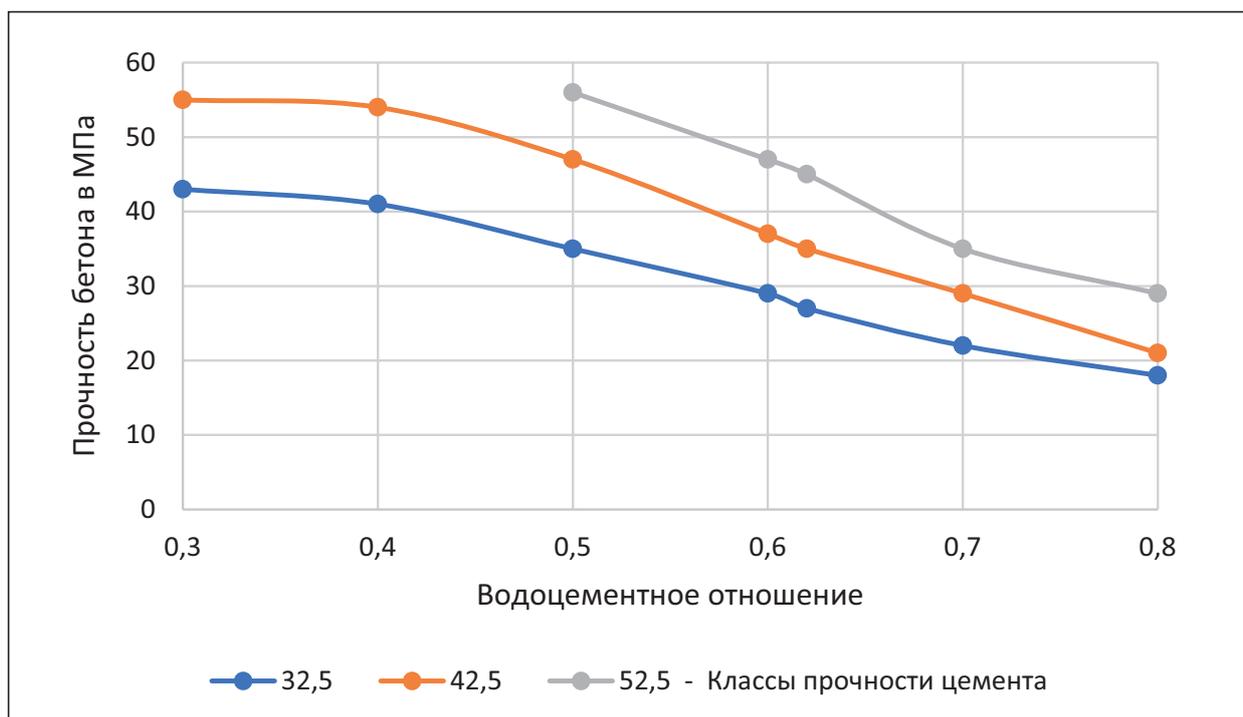


Рис. 2. Увеличение водоцементного отношения при одинаковом классе прочности бетона

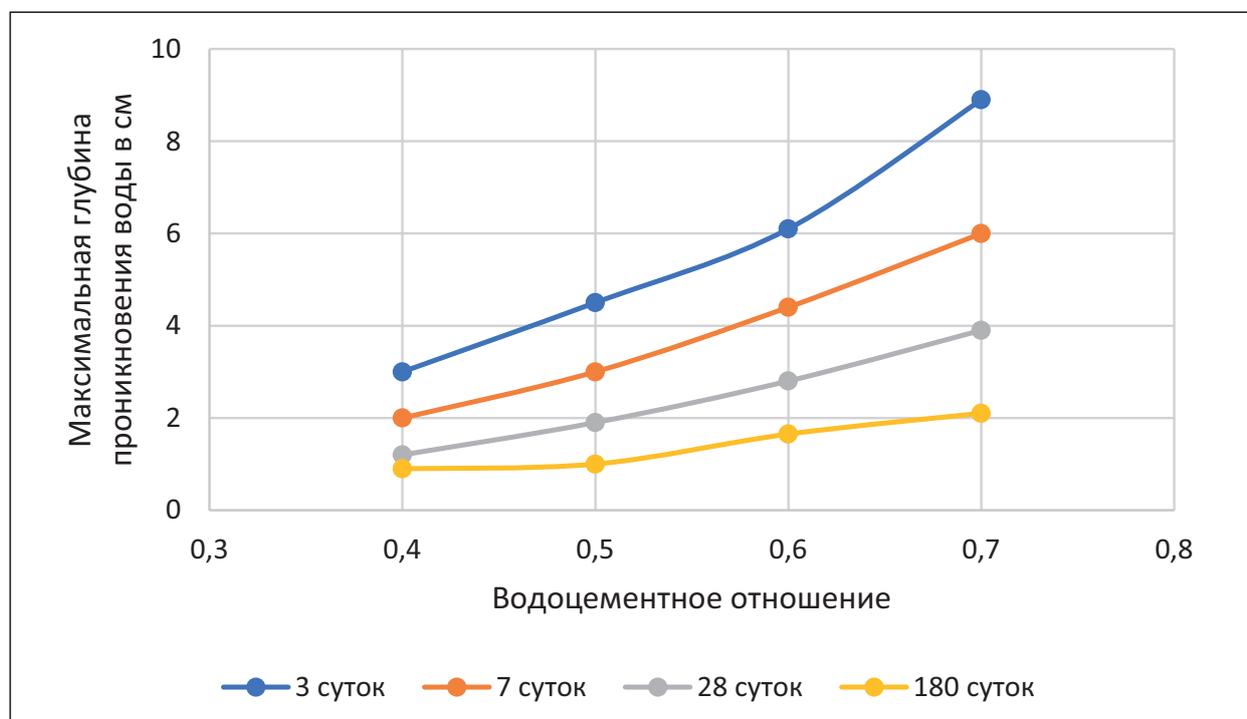


Рис. 3. Максимальная глубина проникновения воды в зависимости от водоцементного отношения и возраста бетона

проникновению углекислого газа (CO_2), вызывающего карбонизацию, и кислорода (O_2), способствующего коррозии стали. При повышении водоцементного отношения газопроницаемость значительно возрастает, особенно при недостаточном последующем уходе за бетоном.

На практике тщательный уход за бетоном при водоцементном отношении до 0,7 может обеспечить лишь незначительное увеличение газопроницаемости. Однако учитывая, что такой уход редко реализуется в реальных условиях, водоцементное отношение $\geq 0,7$ не рекомендуется для конструкций, подверженных коррозионным воздействиям.

Карбонизация

Карбонизация бетона — это процесс, который включает взаимодействие оксида угле-

рода (CO_2) с гидратированными продуктами цементного камня, например с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Такой процесс вызывает химические изменения в структуре бетона из-за образования карбоната кальция (CaCO_3), который уплотняет структуру цементного камня, уменьшает его пористость и улучшает механические свойства, такие как прочность и стойкость к проникновению воды.

Карбонизация цементного камня является процессом, зависящим от водоцементного отношения. Глубина карбонизации увеличивается линейно с увеличением водоцементного отношения, что можно увидеть на рис. 4.

Чем выше водоцементное отношение, тем глубже проникает углекислый газ, ускоряя процесс карбонизации и снижая долговечность бетона. К тому же в процессе карбонизации pH раствора в порах бетона снижается

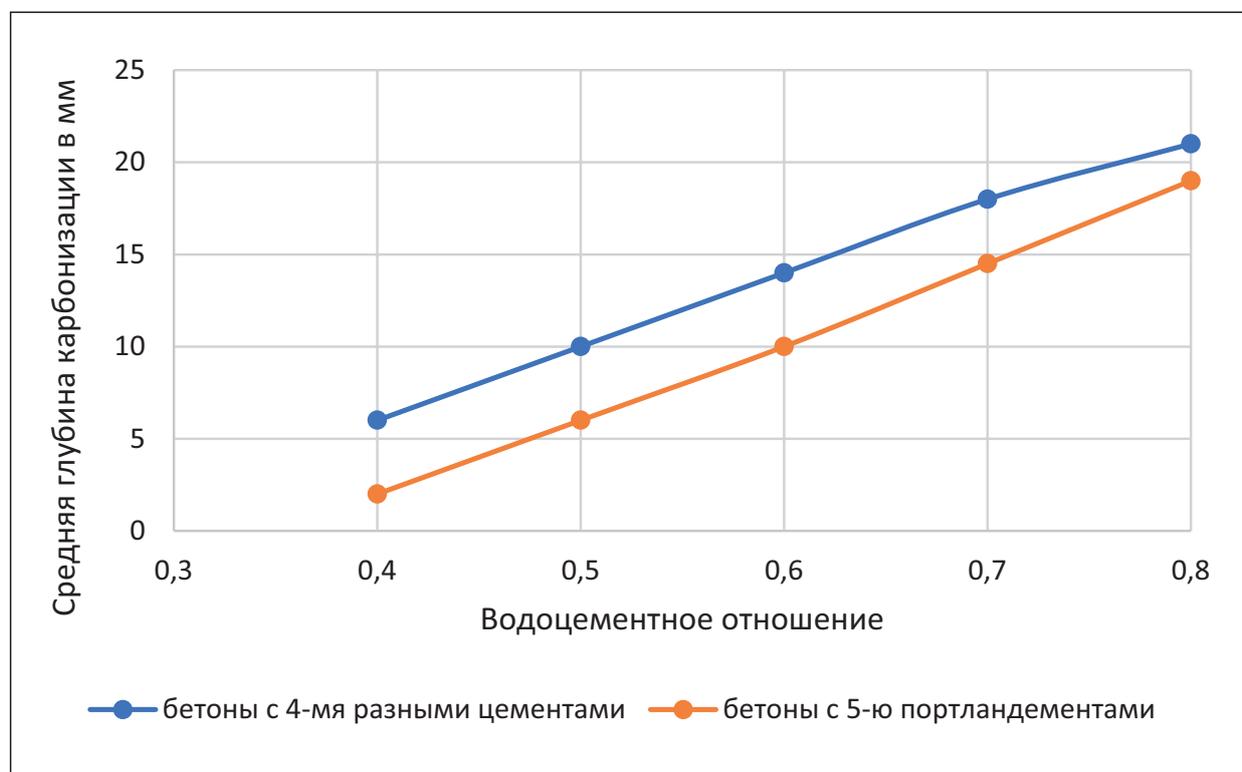


Рис. 4. Влияние водоцементного отношения на глубину карбонизации бетонов с различными цементами. Возраст бетона 8 лет. Выдерживание: $T = 20^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха 65 % [1]

с 12,5–13,5 до значений, близких к нейтральным (около 9). Такое снижение pH приводит к разрушению пассивного защитного слоя на поверхности арматуры, делая ее уязвимой к коррозии. Диффузия оксида углерода в бетоне происходит значительно быстрее в газовой фазе, чем в воде. Поэтому карбонизация быстрее развивается в зонах бетона с низкой влажностью, особенно при относительной влажности воздуха 50–80 %. При повышенной влажности (близкой к 100 %) или в полностью насыщенном влагой бетоне карбонизация замедляется, так как доступ CO_2 к внутренним слоям цементного камня ограничен.

Глубина проникновения хлоридов

Глубина проникновения хлоридов в бетон значительно зависит от водоцементного отношения. Исследования показывают, что при повышении водоцементного отношения с 0,4 до

0,8 глубина проникновения хлоридов может увеличиваться в 2–3 раза. Этот эффект особенно заметен при выдерживании бетона в 4%-м растворе хлорида натрия, где наблюдается почти линейная зависимость между водоцементным отношением и глубиной проникновения хлоридов (рис. 5).

Коррозия арматуры

Одним из основных факторов, влияющих на долговечность железобетонных конструкций, является коррозия арматурной стали, в первую очередь из-за воздействия хлоридов [11]. В этом случае водоцементное отношение и толщина защитного слоя бетона являются критическими характеристиками, влияющими на коррозию арматуры. Ее можно существенно уменьшить за счет увеличения толщины защитного слоя в случае водоцементного отношения до 0,55. Однако при водоцементном отношении,

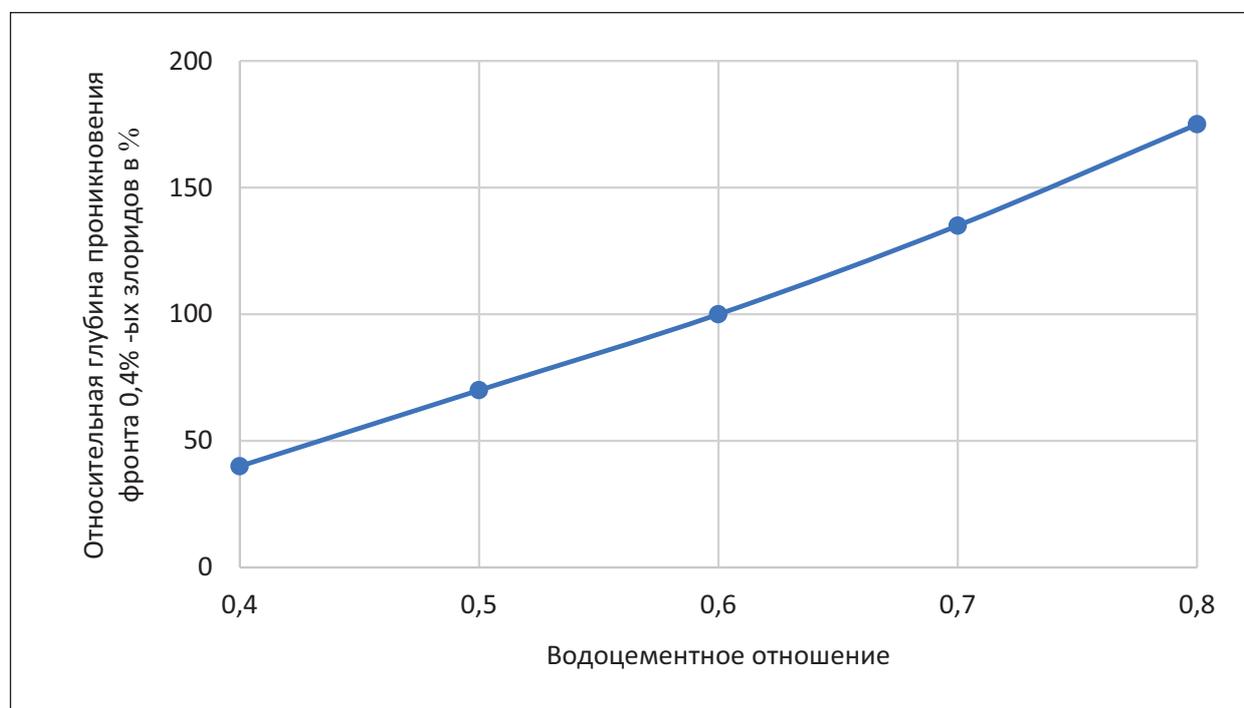


Рис. 5. Влияние водоцементного отношения на относительную глубину проникновения хлоридов. Хранение под водой в 4 %-м растворе Cl, возраст 12 месяцев [1]

превышающем 0,6, даже значительная толщина защитного слоя не может эффективно защитить арматуру от коррозии (рис. 6).

Морозостойкость

Морозостойкость бетона и его способность сопротивляться воздействию солей для размораживания уменьшаются с увеличением водоцементного отношения. Для значительного повышения морозостойкости и устойчивости к воздействию солей можно использовать воздушные микропоры диаметром до 300 мкм. Увеличение водоцементного отношения ведет к росту объема капиллярных пор, в которых при температуре до -20°C замерзает вода. Вода замерзает преимущественно в более крупных капиллярных порах, что приводит к разрушению структуры бетона. Бетоны с низким водоцементным

отношением ($\leq 0,4$) и 100%-й гидратацией цемента более устойчивы к замерзанию. Однако даже при низком водоцементном отношении для дополнительной защиты бетона целесообразно создание воздушных пор (рис. 7).

Таким образом, можно констатировать, что между водоцементным отношением и долговечностью бетона существует четкая зависимость. Увеличение водоцементного отношения негативно влияет на многие технологические характеристики бетона, включая его прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и устойчивость к химическим воздействиям. Поэтому водоцементное отношение играет решающую роль в обеспечении долговечности бетонных конструкций.

Установлены верхние границы водоцементного отношения (в/ц) для обеспечения долго-

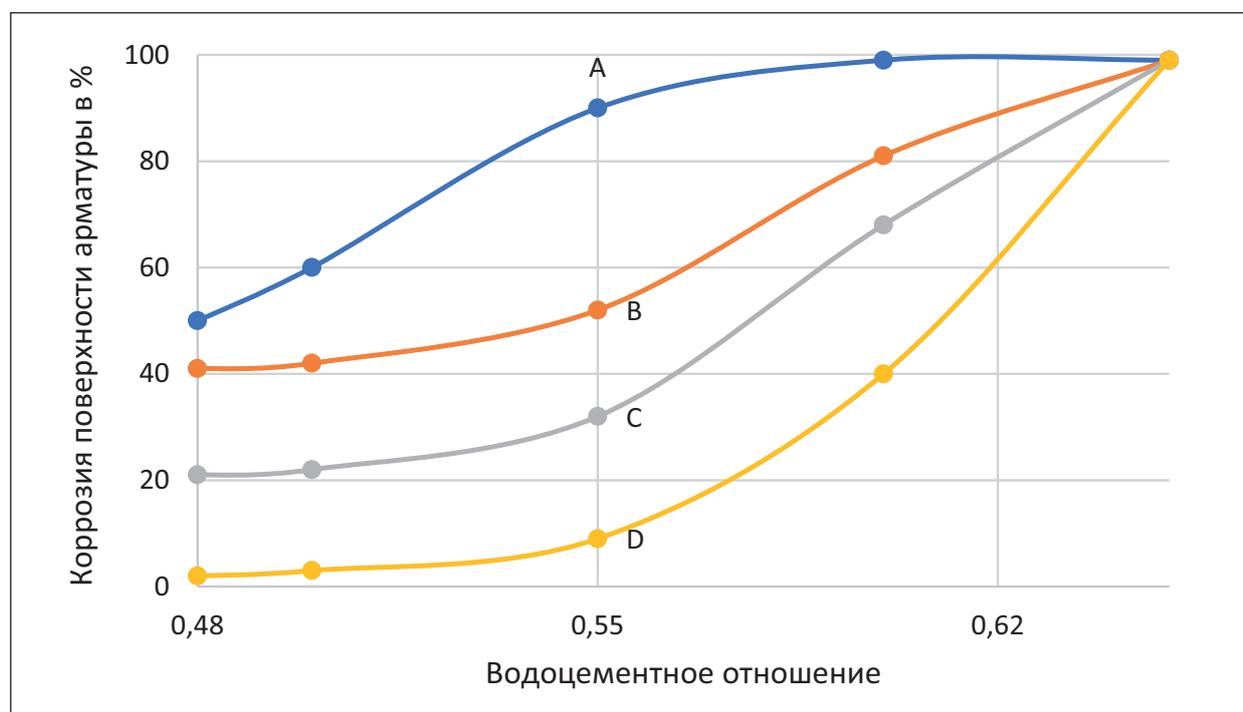


Рис. 6. Коррозия и поверхность арматуры в зависимости от водоцементного отношения и защитного слоя при воздействии NaCl: А — 19 мм; В — 25 мм; С — 38 мм; D — 50 мм. Возраст — 2 года. Сбрызгивание 1 раз в день 3%-м раствором NaCl [1]

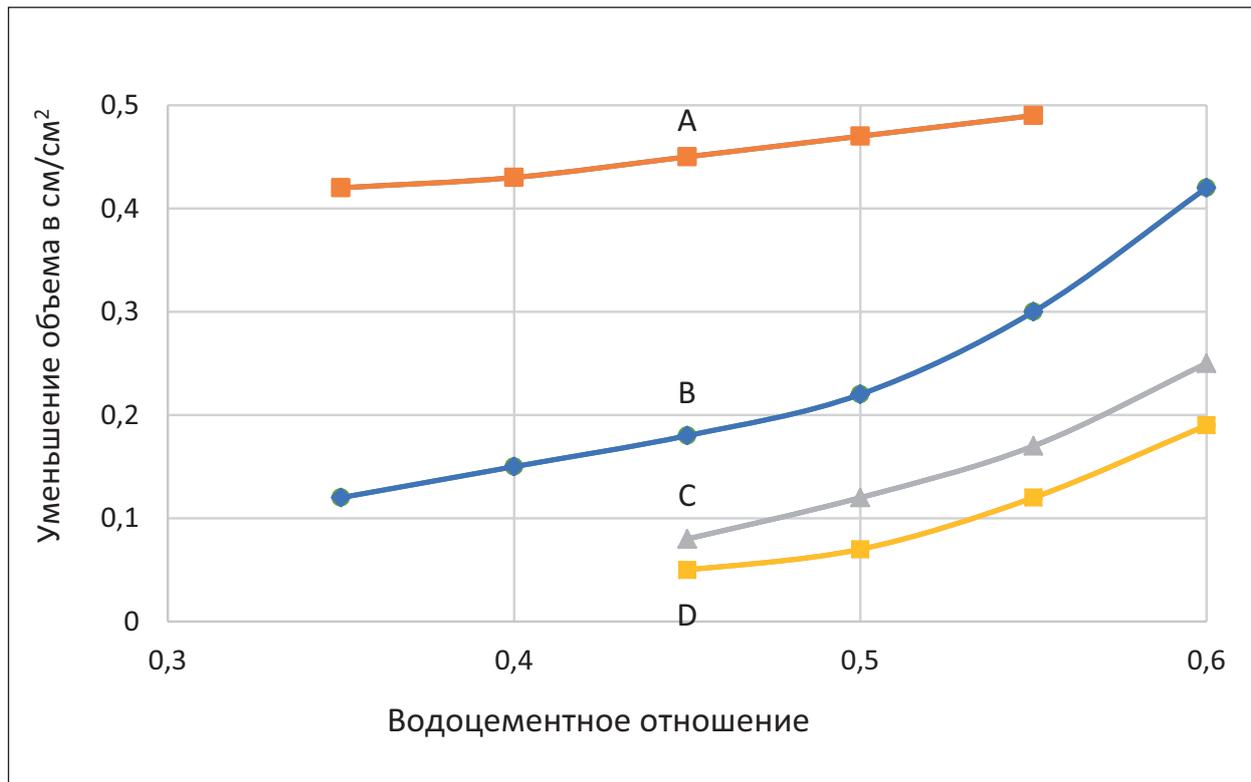


Рис. 7. Сопротивление воздействию мороза и размораживающей соли в зависимости от водоцементного отношения и содержания активных воздушных пор:
 А — без порообразователя; В — P 300 = 1,0 %; С — P 300 = 1,5 %; D — P 300 = 2,0 %. 50 циклов «замораживание/оттаивание» в 3 %-м растворе NaCl. Активные воздушные поры P диаметром < 300 мк. Начало испытаний — после 28 суток нормального твердения [1]

вечности бетона, о чем упоминается в различных публикациях [12]. Для стабильного качества бетона и долговечности конструкций водоцементное отношение должно быть уменьшено на 0,05 от проектного значения, учитывая возможные отклонения в процессе строительства. Например, для изделий из очень жесткого бетона ($v/c < 0,40$) уменьшение водоцементного отношения не требуется.

Для бетона, подверженного воздействию сульфатов, рекомендуется применение цемента высоких марок. В случае применения летучей золы или других добавок водоцементное отношение корректируется в зависимости от конкретных требований и условий эксплуатации.

Обсуждение

На основе представленных результатов можно отметить, что для достижения требуемого уровня долговечности бетонных конструкций необходимо учитывать ряд условий:

1. Четкая концепция проектирования: на этапе проектирования важно предусмотреть все аспекты назначения и эксплуатации конструкции. Концепция должна охватывать вопросы дизайна, функциональности и долговечности.
2. Невосприимчивость конструкции к ошибкам: конструкция должна обладать достаточным запасом прочности, чтобы компенсировать

возможные ошибки в процессе изготовления и монтажа.

3. Качественное исполнение и эксплуатация: исключение небрежности на этапах строительства и эксплуатации является критически важным для сохранения долговечности бетонных конструкций.

Серьезное внимание следует уделить таким факторам, как качество исходных материалов, влияние окружающей среды и правильное применение строительных технологий [13, 14].

Заключение

Проведенное исследование позволило заключить, что повышение водоцементного отношения ведет к увеличению глубины проникновения хлоридов и ускорению процессов карбонизации, что в конечном итоге снижает коррозионную стойкость арматуры и долговечность бетонных конструкций.

Обеспечение долговечности бетонных конструкций требует комплексного подхода, учитывающего не только прочностные характеристики, но и широкий спектр других показателей, непосредственно влияющих на эксплуатационные свойства бетона. Для конкретных условий эксплуатации наиболее важными могут оказаться такие свойства, как морозостойкость, плотность, устойчивость к агрессивным средам и биологическим воздействиям, трещиностойкость и способность противостоять карбонизации.

И хочется повторить, что для достижения долговечности бетонных и железобетонных конструкций необходимо строго контролировать водоцементное отношение, применять качественные добавки и соблюдать нормы ухода за бетоном. Дополнительные меры пассивной защиты, такие как пропитка и нанесение защитных покрытий, могут существенно

продлить срок службы железобетонных конструкций, особенно в условиях агрессивного воздействия окружающей среды.

Библиографический список

1. Stark J., Wicht B. Dauerhaftigkeit von beton. Springer-Verlag, 2013. 479 p.
2. Беленцов Ю.А., Казанская Л.Ф. Неразрушающие методы контроля качества как фактор надежности бетонных и железобетонных конструкций в транспортных сооружениях // Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4, № 1. С. 58–67.
3. Бредихин В.В., Бредихина Н.В. Учет факторов, влияющих на долговечность конструкций из бетона и железобетона, при технической экспертизе // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 6-й Междунар. молодежн. науч.-практ. конф. (Курск, 13 ноября 2019 года). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 53–58.
4. Братошевская В. В. Долговечность бетона при воздействии органических сред // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: сб. ст. по материалам конф. архитектурно-строительного факультета (Краснодар, 20 мая 2022 года). Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, 2022. С. 8–12.
5. Братошевская В. В., Мирсоянов В.Н., Мирсоянов Р.В. Факторы, влияющие на напряженное состояние в структуре цементного камня // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Пенза, 30 ноября 2014 года) / под ред. Н.Н. Ласькова. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2014. С. 26–29.
6. Добшиц Л.М., Николаева А.А. Долговечность бетонных конструкций, подвергающихся циклическому увлажнению и высушиванию // Студент-инновации России. 2019. № 4. С. 41–44.
7. Добшиц Л.М. Долговечность бетона и пути ее повышения // Наука — строительному производ-

ству: сб. науч. тр. к 60-летию института. М.: НИИ-Мосстрой, 2016. С. 214–229.

8. Евсеев А.В., Черкасов А.В., Веселова П.А. К вопросу о долговечности бетона из вторсырья // Перспективы науки. 2020. № 11(134). С. 236–237.

9. Казанская Л.Ф., Черепанова Д.А. Оценка влияния на бетон внешних и внутренних воздействий как фактор снижения затрат на эксплуатацию объектов транспортного строительства // Развитие экономической науки на транспорте: мобильность, доступность, интеграция транспорта в экономике независимости: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 8 декабря 2023 года). М.: Магистраль, 2023. С. 98–108.

10. Долговечность бетона и железобетона в газовой среде предприятий нефтехимии и нефтепереработки / П.А. Федоров [и др.] // Строительные материалы. 2021. № 11. С. 16–22.

11. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.

12. Рябчиков П.В., Батыновский Э.И., Якимович В. Д. Об особенностях подбора состава и технологии производства тяжелого высокопрочного бетона,

включая введение в состав углеродных наноматериалов // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства. 2014. С. 136–141.

13. Шестакова Е.Б., Кузьминов О.О. Долговечный бетон для современных прогрессивных конструкций // Путевой навигатор. 2021. № 49(75). С. 44–51.

14. Шулдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я. Структурный фактор долговечности бетона // Наука ЮУрГУ: материалы 70-й науч. конф. (Челябинск, 25 апреля — 4 мая 2018 года). Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2018. С. 169–177.

Дата поступления: 19.08.2024

Решение о публикации: 26.09.2024

Контактная информация:

КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — докт. техн. наук, профессор; yalifa@inbox.ru

МАЙЕР Виктория Александровна — аспирант кафедры «Строительные материалы и технологии»; vika.denisova.kos.a@mail.ru

СИБГАТУЛЛИН Эмер Сулейманович — докт. физ-мат. наук, профессор кафедры строительства; ESSibgatullin@ksu.ru

The relationship of factors determining the durability of concrete

L.F. Kazanskaya¹, V.A. Mayer¹, E. S. Sibgatullin²

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

² Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga region) Federal University, 1, Stroitelej st., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia

For citation: Kazanskaya L. F., Mayer V. A., Sibgatullin E. S. The relationship of factors determining the durability of concrete // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 931–943. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943

Abstract

Purpose: to show the influence of various factors such as water-cement ratio, carbonation, chloride penetration and frost resistance on the durability of concrete and its ability to protect reinforcement from

corrosion. **Methods:** applied methods of analysis and modeling. Based on a comparative study of existing data, norms and scientific publications, the interrelationships between the water-cement ratio, the depth of chloride penetration, carbonation and frost resistance of concrete, as well as their effect on the corrosion resistance of reinforcing steel, are considered. **Results:** it has been established that the water-cement ratio is one of the most important parameters determining the durability of concrete. An increase in the water-cement ratio leads to an increase in the depth of chloride penetration and acceleration of carbonation processes, which ultimately reduces the corrosion resistance of reinforcement and the durability of concrete structures. **Practical significance:** in production conditions, ensuring the durability of concrete structures requires an integrated approach that takes into account not only strength characteristics, but also a wide range of other indicators that directly affect the performance properties of concrete. For specific operating conditions, properties such as frost resistance, density, resistance to aggressive media and biological influences, crack resistance and the ability to resist carbonation may be the most important.

Keywords: durability of concrete, water-cement ratio, strength, frost resistance, density, resistance to aggressive environments

References

1. Stark J., Wicht B. *Dauerhaftigkeit von beton*. Springer-Verlag, 2013. 479 p.
2. Belencov Yu.A., Kazanskaya L.F. Nerazruchayushchie metody kontrolya kachestva kak faktor nadezhnosti betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij v transportnyh sooruzheniyah // *Transportnye sistemy i tekhnologii*. 2018. T. 4, No. 1. S. 58–67. (In Russian)
3. Bredihin V. V., Bredihina N. V. Uchet faktorov, vliyayushchih na dolgovechnost' konstrukcij iz betona i zhelezobetona, pri tekhnicheskoy ekspertize // *Kachestvo produkcii: kontrol', upravlenie, povyshenie, planirovanie*: sb. nauch. tr. 6-j Mezhdunar. molodezhnoj nauch.-prakt. konf. (Kursk, 13 noyabrya 2019 goda). Kursk: YUgo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2019. S. 53–58. (In Russian)
4. Bratoshevskaya V. V. Dolgovechnost' betona pri vozdejstvii organicheskikh sred // *Obsledovanie zdaniy i sooruzhenij: problemy i puti ih resheniya*: sb. st. po materialam konf. arhitekturno-stroitel'nogo fakul'teta (Krasnodar, 20 maya 2022 goda). Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. I. T. Trubilina, 2022. S. 8–12. (In Russian)
5. Bratoshevskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R. V. Faktory, vliyayushchie na napryazhennoe sostoyanie v strukture cementnogo kamnya // *Effektivnye stroitel'nye konstrukcii: teoriya i praktika*: sb. st. XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Penza, 30 noyabrya 2014 goda) / pod red. N.N. Las'kova. Penza: Privolzhskij Dom znaniy, 2014. S. 26–29. (In Russian)
6. Dobshic L.M., Nikolaeva A.A. Dolgovechnost' betonnyh konstrukcij, podvergayushchihsya ciklicheskomu uvlazhneniyu i vysushivaniyu // *Student-innovacii Rossii*. 2019. No. 4. S. 41–44. (In Russian)
7. Dobshic L.M. Dolgovechnost' betona i puti ee povysheniya // *Nauka — stroitel'nomu proizvodstvu*: sb. nauch. tr. k 60-letiyu instituta. M.: NIIMosstroj, 2016. S. 214–229. (In Russian)
8. Evseev A.V., Cherkasov A.V., Veselova P. A. K voprosu o dolgovechnosti betona iz vtorsyr'ya // *Perspektivy nauki*. 2020. No. 11(134). S. 236–237. (In Russian)
9. Kazanskaya L.F., Cherepanova D.A. Ocenka vliyaniya na beton vneshnih i vnutrennih vozdeystvij kak faktor snizheniya zatrat na ekspluatatsiyu ob'ektov transportnogo stroitel'stva // *Razvitie ekonomicheskoy nauki na transporte: mobil'nost', dostupnost', integraciya transporta v ekonomike nezavisimosti*: sb. nauch. st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 8 dekabrya 2023 goda). M.: Magistral', 2023. S. 98–108. (In Russian)
10. Dolgovechnost' betona i zhelezobetona v gazovoj srede predpriyatij neftekhimii i neftepererabotki / P. A. Fedorov [i dr.] // *Stroitel'nye materialy*. 2021. No. 11. S. 16–22. (In Russian)

11. Korroziya betona i zhelezobetona. Metody ih zashchity / V. M. Moskvina [i dr.]. M.: Strojizdat, 1980. 536 s. (In Russian)
12. Ryabchikov P.V., Batyanovskii E.I., YAKimovich V. D. Ob osobennostyakh podbora sostava i tekhnologii proizvodstva tyazhelogo vysokoprochnogo betona, vklyuchaya vvedenie v sostav uglerodnykh nanomaterialov // *Sovremennye problemy vnedreniya evropeiskikh standartov v oblasti stroitel'stva*. 2014. S. 136–141. (In Russian)
13. Shestakova E.B., Kuz'minov O.O. Dolgovechnyj beton dlya sovremennykh progressivnykh konstrukcij // *Putevoj navigator*. 2021. No. 49(75). S. 44–51. (In Russian)
14. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B. Ya. Strukturnyj faktor dolgovechnosti betona // *Nauka YUUrGU: materialy 70-j nauch. konf. (Chelyabinsk, 25 aprelya — 4 maya 2018 goda)*. Chelyabinsk: IC YuUrGU, 2018. S. 169–177. (In Russian)

Received: 19.08.2024

Accepted: 26.09.2024

Author's information:

Liliya F. KAZANSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru

Victoria A. MAYER — Postgraduate Student; vika.denisova.kos.a@mail.ru

Emer S. SIBGATULLIN — Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; ESSibgatullin@ksu.ru

УДК 624.012.2

Инновационные способы усиления стен

В. В. Веселов

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

Для цитирования: Веселов В. В. Инновационные способы усиления стен. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 944–953. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-944-953

Аннотация

Цель: выполнить анализ возможного применения композитных материалов для усиления каменных конструкций стен и столбов, исследовать возможное снижение материалоемкости и трудоемкости инновационных вариантов усиления при повышении надежности и долговечности. **Методы:** анализ преимуществ известных гибридных конструкций, применяемых для их проектирования материалов, расчет вариантов конструкции с применением существующих инженерных методик и с привлечением расчетных программ. **Результаты:** традиционные конструктивные решения по усилению каменных конструкций не всегда обладают достаточной надежностью и долговечностью. Недостатками известных решений являются повышенная материалоемкость конструкции усиления по причине чрезмерного расхода бетона, стали, чрезмерное увеличение поперечного сечения, а также недостаточная эксплуатационная надежность конструкции усиления, связанная с коррозионным износом стальных элементов. На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС разработан ряд эффективных гибридных конструкций с применением композитных материалов. Предложена конструкция усиления простенка, защищаемая патентом на изобретение. Она включает элементы усиления, установленные и закрепленные в усиливаемой конструкции с возможностью обеспечения совместной работы с ней. Элементы усиления выполнены в виде рядов из композитных стержней, установленных на полимерном растворе в поперечных швах кирпичной кладки и образующих армированные слои по высоте усиливаемой конструкции. Элементы усиления в верхней части усиливаемой конструкции выполнены из углепластиковой ткани, приклеенной к поверхности кирпичного простенка по всему контуру. Выполнен конструктивный расчет вариантов усиления, произведен анализ снижения веса конструкции, материалоемкости, трудоемкости и других преимуществ инновационного решения в сравнении с традиционными методами усиления каменных конструкций. **Практическая значимость:** выявлены преимущества композитных материалов при усилении каменных конструкций. По сравнению с традиционными конструкциями инновационная конструкция усиления имеет в 2,5–4 раза более низкий вес при снижении стоимости на 10–30% и повышении долговечности. Предлагаемое конструктивное решение может быть рационально для применения при усилении кирпичных стен и столбов с перегрузом до 60–80%, а также участков стен, поврежденных осадочными трещинами.

Ключевые слова: усиление, каменные конструкции, стены, столбы, композитные материалы, полимеры, углепластик, несущая способность, долговечность

Введение

Проектирование современных зданий и сооружений, в том числе транспортных, активно развивается в части применения гибридных конструкций [1], а именно с применением композитных материалов на полимерной основе [2, 3].

Здания и сооружения на транспорте при эксплуатации испытывают различные негативные воздействия (динамические воздействия, удары, перепады температур, агрессивная окружающая среда, неравномерные осадки

и т. п.), которые могут привести к появлению и развитию различных дефектов и повреждений и, соответственно, к снижению несущей способности и долговечности [4,5].

Многие здания и сооружения, запроектированные в XX веке по стеновой конструктивной схеме, возведены с применением каменной кладки из кирпича. Такие здания фактически имеют значительные сроки эксплуатации, иногда 100 и более лет, с большим физическим износом. Стены и столбы из каменной кладки, как правило, подвержены следующим дефектам и повреждениям: физическая коррозия при намокании, нарушение связности, осадочные, температурные и силовые трещины [6, 7]. Наиболее критичными являются силовые трещины в простенках и столбах, которые свидетельствуют о полном исчерпании несущей способности, аварийном техническом состоянии [8] и создают возможную угрозу обрушения.

В этом случае требуется усиление поврежденных конструкций. Кроме того, часто при реконструкции и капитальном ремонте объекта возникает необходимость увеличения полезных нагрузок. Для решения этих проблем могут быть использованы известные способы усиления простенков и столбов: железобетонной, металлической или штукатурной обоймой [9, 10].

Конструкция усиления кирпичной кладки стальной обоймой состоит, как правило, из угловых профилей по контуру простенка, которые объединены соединительными планками. Недостатком такого конструктивного решения является повышенная материалоемкость конструкции усиления по причине чрезмерного расхода стали на обойму, а также недостаточная эксплуатационная надежность конструкции усиления, связанная с коррозионным износом стальных элементов и отслоением отделочных слоев от стальных элементов при перепаде температур.

Конструкция усиления кирпичной кладки железобетонной обоймой состоит из монолитного бетона толщиной от 60 мм и продольных стальных стержней, которые объединены стальными хомутами. Недостатками такого конструктивного решения являются повышенная материалоемкость конструкции усиления по причине чрезмерного расхода бетона и стали на стержни и хомуты, чрезмерное увеличение поперечного сечения простенка, а также недостаточная эксплуатационная надежность конструкции усиления, связанная с коррозионным износом стальных элементов.

Конструкция усиления кирпичной кладки растворной или штукатурной обоймой состоит из цементно-песчаного раствора толщиной до 40 мм и продольных стальных стержней, которые объединены стальными хомутами. Недостатками такого конструктивного решения являются повышенная материалоемкость конструкции усиления по причине чрезмерного расхода стали на нерабочие продольные стержни, а также недостаточная эксплуатационная надежность конструкции усиления, связанная с коррозионным износом стальных элементов.

Имеются инновационные разработки усиления простенков и столбов из каменной кладки. Например, известна конструкция для усиления кирпичных простенков [11], состоящая из элементов усиления, установленных и прикрепленных в пробуренных отверстиях в усиливаемом простенке, при этом элементы усиления прикреплены с возможностью обеспечения совместной работы с усиливаемым простенком и выполнены в виде рядов стержней из стальной арматуры, установленных на песчано-цементном растворе в пробуренных отверстиях и образующих слой армирования по высоте усиливаемого простенка. Недостатком такого конструктивного решения является повышенная трудоемкость по причине

бурения отверстий в кирпичной кладке, а также недостаточная эксплуатационная надежность конструкции усиления, связанная с коррозионным износом стальных элементов.

В настоящее время активно внедряются способы усиления каменных конструкций с использованием композитных материалов (полимеров, армированных арамидными, углеродными и другими волокнами или стеклотканью) в виде приклеенной системы внешнего армирования лентами и сетками или вклеенных композитных стержней. Эти способы уже нашли свое применение для деревянных, бетонных, железобетонных конструкций [12] и возможны также для усиления каменных конструкций [9].

Экспериментальные исследования усиления каменной кладки композитными лентами и сетками выявляют значительное повышение несущей способности кладки — на 30–80% в зависимости от армирующих волокон и размеров поперечного сечения усиления [13].

Элементы усиления приклеивают или вклеивают обычно при помощи клея на эпоксидной основе. Однако, как показывают исследования [14], в качестве адгезива более эффективным для безопасности проведения работ и повышения огнестойкости является микроцемент с добавлением полимерных смол.

Достоинства применения усиления стен и столбов с применением композитов очевидны:

- высокие прочностные характеристики материалов;
- незначительный вес элементов и их небольшие размеры;
- выполнение усиления без прекращения эксплуатации и применения сварных соединений, что может быть необходимо для зданий и сооружений на транспорте;
- долговечность композитного материала (не подвергается коррозии);
- быстрота ремонтных работ.

В качестве недостатков усиления с использованием композитов нужно отметить в ряде случаев высокую стоимость материалов, трудоемкость подготовки поверхности, низкую огнестойкость и отсутствие достаточной прочности материалов на сжатие и сдвиг. Недостатки могут быть компенсированы правильным выбором материалов, рациональным расположением элементов усиления на поверхности и оштукатуриванием поверхности.

Сотрудниками кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС исследуются инновационные конструкции и элементы с использованием композитных материалов [15–17], которые можно применять как при проектировании различных элементов, так и при капитальном ремонте и реконструкции зданий и сооружений.

Практическое применение и результаты

Предлагается конструкция усиления кирпичного простенка или столба (рис. 1), защищенная патентом на изобретение [17].

Инновационная конструкция усиления имеет элементы усиления, расположенные и прикреплённые в усиливаемой конструкции (простенок или столб) с обеспечением совместной с этой конструкцией работы. Элементы усиления представляют собой ряды композитных стержней, которые установлены в поперечных швах кирпичной кладки на полимерном растворе и образуют по высоте усиливаемой конструкции (простенка или столба) армированные слои усиления. Элементы усиления являются косвенным армированием каменной кладки, а именно обеспечивают восприятие деформаций поперек элемента, которые вызывают растягивающие напряжения в усиливаемом элементе.

В верхней части усиливаемой конструкции (простенка или столба) элементы усиления

могут быть выполнены из углепластиковой ткани, приклеенной к поверхности кирпичного простенка по всему контуру, и устанавливаются при необходимости, например при существенных сосредоточенных нагрузках. Поверхность усиливаемой конструкции по всей площади может иметь штукатурный слой с добавлением композитной фибры для повышения трещиностойкости, а также огнестойкости усиления.

Ряды из композитных стержней элементов усиления выполнены из стеклопластика диаметром до 6 мм, что обычно соответствует толщине швов кирпичной кладки, и устанавливаются на полимерном растворе в поперечных швах после их расшивки на глубину не менее

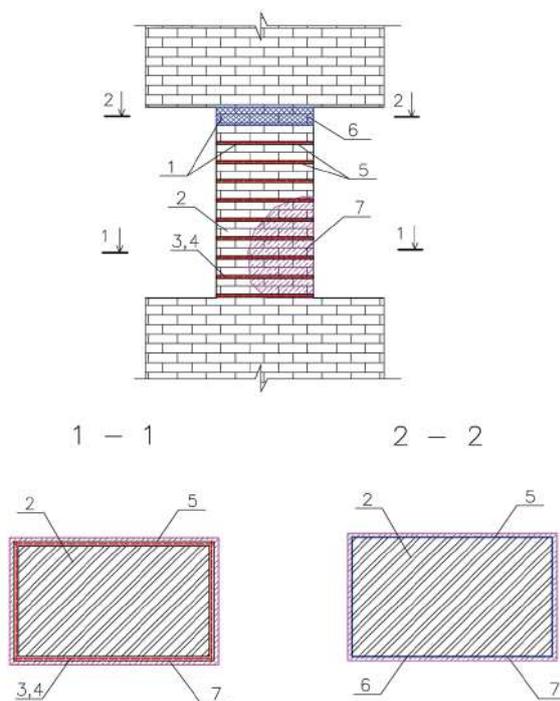


Рис. 1. Конструкция усиления простенка:

- 1 — элементы усиления; 2 — усиливаемый элемент (кирпичный простенок);
- 3 — композитный стержень; 4 — полимерный раствор; 5 — поперечные швы кладки; 6 — углепластиковая ткань; 7 — штукатурный слой

10 мм. Углепластиковая ткань элементов усиления в верхней части усиливаемой конструкции приклеивается к поверхности кирпичного простенка по всему контуру после ее расшивки и выравнивания.

Использование композитных стержней небольшого диаметра, установленных в поперечных швах кирпичной кладки, упрощает устройство каналов для установки элементов усиления и снижает трудоемкость конструкции усиления кирпичного простенка.

Применение композитных стержней из стеклопластика, установленных на полимерном растворе, и углепластиковой ткани, приклеенной к поверхности кирпичного простенка, позволяет избежать коррозионного износа элементов усиления, что повышает эксплуатационную надежность конструкции усиления кирпичного простенка.

Применение композитных стержней из стеклопластика и углепластиковой ткани позволяет избежать отслоения отделочных слоев от поверхности кирпичного простенка, что повышает эксплуатационную надежность конструкции усиления элемента.

Применение в качестве элемента усиления углепластиковой ткани, приклеенной к поверхности кирпичного простенка в верхней части по всему контуру, дополнительно увеличивает несущую способность в наиболее нагруженной части усиливаемой конструкции, что повышает эксплуатационную надежность.

Использование на поверхности усиливаемой конструкции штукатурного слоя с добавлением композитной фибры повышает несущую способность кирпичного простенка и трещиностойкости отделочного слоя, что повышает эксплуатационную надежность конструкции усиления кирпичного простенка.

Несущая способность конструкции усиления кирпичного простенка обеспечивается

подбором диаметра и шага композитных стержней, толщины углепластиковой ткани и параметров армирования штукатурного слоя.

Расчет каменных простенков и столбов при их центральном сжатии продольной силой с усилением внешним армированием из композитных материалов может быть выполнен по формуле:

$$N < m_g \cdot \varphi \cdot R_{rf} \cdot A, \quad (1)$$

где N — продольная сила сжатия;

R_{rf} — расчетное сопротивление кладки сжатия с усилением внешним армированием из композитов на полимерной основе, вычисляемое по формуле:

$$R_{rf} = R + \rho \cdot \mu \cdot R_f / 100 < 2R, \quad (2)$$

где R — расчетное сопротивление кладки сжатия, вычисляемое по требованию СП [18]; φ — коэффициент устойчивости (продольного изгиба), вычисляемый по требованиям СП [18];

A — площадь поперечного сечения простенка, столба;

m_g — коэффициент, который учитывает длительность нагрузки, вычисляемый по требованиям по СП [18];

ρ — коэффициент пустотности кирпича (камня) кладки, принимаемый: 2 — при пустотности до 20% включительно, 1,5 — при пустотности от 20% до 30% включительно, 1 — при пустотности выше 30%;

μ — коэффициент армирования поверхности простенка, столба композитным материалом, вычисляемый по формуле:

$$\mu = 100 S_{bd} / S_w, \quad (3)$$

где S_{bd} — площадь сечения элемента усиления с толщиной t_{bd} и с высотой h_{bd} , вычисляемая по формуле:

$$S_{bd} = 2 t_{bd} \cdot h_{bd}, \quad (4)$$

где S_w — площадь части простенка с длиной стороны h_w , приходящаяся на одну полосу

(элемент усиления) из полимерного композита высотой h_{bd} , находится по формуле:

$$S_w = h_w \cdot (h_{bd} + b), \quad (5)$$

где R_f — расчетное значение прочности композитного материала при растяжении,

b — расстояние в свету между слоями или элементами усиления.

Из формулы (1) очевидно, что несущая способность усиленного элемента может быть увеличена до 100%.

Для оценки эффективности предлагаемого конструктивного решения усиления центрально-сжатого простенка размерами $h = 0,64$, $b = 0,9$ м, высотой этажа 4 м, с нагрузкой $N = 120$ тс, маркой кирпича М150 и раствора М50 было сформировано три варианта: с металлическим, железобетонным и инновационным композитным усилением (рис. 2).

Расчет вариантов усиления выполнялся по методу предельных состояний с подбором поперечных сечений по действующим нормативам [9, 18]. Результаты расчета элемента без усиления выполнены с привлечением программы «Камин» проектно-вычислительного комплекса SCAD Office. В качестве исходных данных приняты параметры: сечение простенка — 900×640 мм, марка камня (глиняный кирпич) — М150, марка раствора (цементный) — М50, расчетная высота элемента — 4 м, продольная сила сжатия — $N = 1200$ кН. Выявлено, что простенок перегружен на 24%.

Усиление по инновационному варианту принимается стеклопластиковой арматурой d5 мм, клеиваемой в швах кладки через два слоя кладки по высоте простенка. Тогда несущая способность усиленной кладки по методике формул (1–5):

$$N = 1200 \text{ кН} < m_g \cdot \varphi \cdot R_{rf} \cdot A = 1 \cdot 0,9 \cdot 2570 \cdot 0,576 = 1332 \text{ кН}, \quad (6)$$

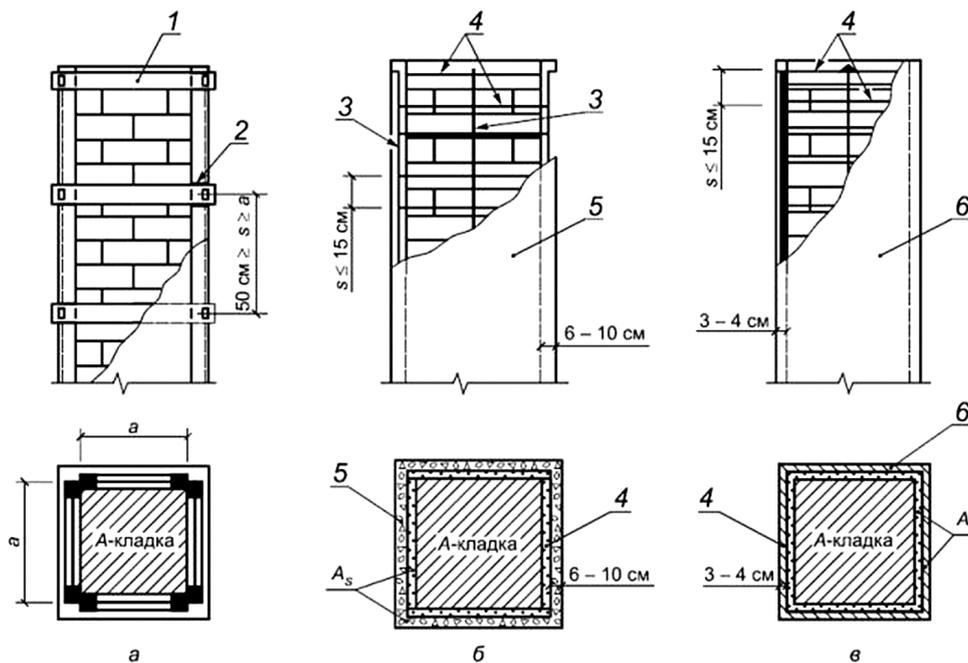


Рис. 2. Поперечные сечения вариантов усиления простенка: а) обойма металлическая, б) обойма железобетонная; в) обойма из композитного материала; 1 — планки из стали; 2 — прокатные уголки из стали; 3 — продольные стержни из арматурной стали; 4 — поперечные стержни из стали и композитного материала; 5 — бетон; 6 — штукатурка

где $R_{rf} = R + \rho \cdot \mu \cdot R_f / 100 = 1,8 + 2 \cdot 0,038 \times 1000 / 100 = 2,57$ МПа — расчетное значение сопротивления сжатию кладки с усилением композитом;

$R = 1,8$ кПа — расчетное сопротивление кладки сжатию из кирпича марки М150 и раствора марки М50;

$\varphi = 0,9$ — коэффициент устойчивости (продольного изгиба) [18];

$A = 5760$ см² — площадь поперечного сечения простенка размерами 900×640 мм;

$m_s = 1$ — коэффициент длительности нагрузки [18];

$\rho = 2$ — коэффициент пустотности кирпича (камня);

$\mu = 100 S_{bd} / S_w = 100 \cdot 0,5 / 1305 = 0,038\%$ — коэффициент армирования поверхности кладки композитным материалом;

$S_{bd} = 2t_{bd} \cdot h_{bd} = 2 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,5$ см — площадь сечения элемента усиления;

$S_w = h_w \cdot (h_{bd} + b) = 90 \cdot (0,5 + 14) = 1305$ см² — площадь участка, приходящаяся на одну полосу из полимерного композита;

$R_f = 1000$ МПа — предел прочности полимерного композита при растяжении;

$b = 0,14$ м — шаг элементов армирования.

По результатам расчетов (табл. 1) и анализа установлено, что конструкция усиления кирпичного простенка композитными материалами имеет в 2,5–4 раза более низкий вес при снижении стоимости на 10–30% в сравнении с традиционными конструкциями усиления из стали и железобетона, а также при повышении долговечности.

Таким образом, предлагаемая конструкция усиления простенка, являясь максимально компактной, приводит к снижению материалоемкости и повышению эксплуатационной надежности конструкции усиления кирпичного простенка.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение вариантов усиления простенка

Тип конструкции	Усиление	Расход бетона, раствора, м ³	Расход металла, кг	Расход композита, м пог./кг	Примерная стоимость в деле, тыс. руб.
Металлическая обойма	4 уголка 100 · 8 мм, планки 150 · 5 мм с b = 0,5 м, сталь С245, штукатурка 30 мм	0,18	200	—	32
Железобетонная обойма	ар-ра 14 d16 A500 и d8 A500 с b = 0,15 м, бетон В20 толщиной 60 мм	0,38	65	—	22
Композитная обойма	стеклопласт. ар-ра d5 в швах с b = 0,14 м, штукатурка 20 мм	0,13	—	45/2,2	20

Заключение

Разработана инновационная конструкция усиления каменной кладки для повышения несущей способности эксплуатируемых зданий и сооружений, в том числе на транспорте. Конструкция усиления кирпичного простенка, столба состоит из элементов усиления, которые размещены и прикреплены в усиливаемой конструкции с обеспечением совместной работы с каменной кладкой. Предлагаемые элементы усиления представлены рядами стержней из композитного материала диаметром 4–6 мм, которые вклеены на полимерном растворе в поперечные швы кирпичной кладки простенка, столба и образуют по высоте усиливаемой конструкции армированные слои. Разработанная новая конструкция усиления кирпичного простенка, столба обладает небольшим весом (в 2,5–4 раза легче металлической, железобетонной обойм) при относительно небольшой стоимости (на 10–30% дешевле металлической, железобетонной обойм) и при повышении долговечности. Предлагаемое конструктивное решение может быть рационально для применения при усилении кирпичных стен и столбов с перегрузом до 60–80%, а также может быть использовано при усилении участков стен, поврежденных осадочными трещинами.

Библиографический список

1. Веселов В., Талантова К. Гибридные балочные конструкции транспортных сооружений // Конспекты лекций по сетям и системам 402 LNNS. 278 с.
2. Применение композитных материалов при ремонте мостовых сооружений / А.А. Белый [и др.] // Композитные системы на объектах подземного и гражданского строительства: сборник трудов I Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 27–28 сентября 2018 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2019. С. 47–54.
3. Егоров В.В., Абу-Хасан М.С., Веселов В.В. Армирование деревянных конструкций с использованием композитов из наноглеродного волокна // Композитные системы на объектах подземного и гражданского строительства: сборник трудов I Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 27–28 сентября 2018 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2019. С.107–113.
4. Дмитренко Е. А., Почтар Н. В. Основные типы дефектов и повреждений железобетонных конструкций транспортных сооружений, причины их возникновения // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. №3 (119). С. 134–138.

5. Карапетов Э.С., Белый А.А. Эксплуатационная надежность мостовых сооружений в суровых климатических условиях // Путевой навигатор. 2020. № 43 (69). 2 с.
6. Причины и механизмы повреждения штукатурного покрытия фасадов исторических каменных зданий / Р.Б. Орлович [и др.] // Социология города. 2023. № 2. С. 59–77. DOI: 10.35211/19943520_2023_2_59
7. Габрусенко В. В. Аварии, дефекты и усиление железобетонных и каменных конструкций в вопросах и ответах. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2012. 124 с.
8. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
9. СП 427.1325800.2018. Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления.
10. Гроздов В.Т. Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений: учебник для вузов. СПб., 2005. 114 с.
11. Устройство для усиления несущих конструкций: патент на изобретение № 2602840 С1 Российская Федерация, Е04G 23/02. № 2015149320/03 / А.А. Юрченко; заявл. 17.11.2015; опубл. 20.11.2016; заявитель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».
12. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.
13. Старцев С.А., Сундукова А.А. Усиление кирпичной кладки композитными материалами и винтовыми стержнями // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 6 (21). С. 17–31.
14. Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallets / E. Bernat-Maso [et al.] // Construction and Building materials. Spain, 2013. P. 3–13.
15. Металлокомпозитная балка: патент на полезную модель № 211900 U1 Российская Федерация, МПК Е04С 3/06. № 2021136843 / В. В. Веселов, Е. И. Никонова; заявл. 13.12.2021; опубл. 28.06.2022; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».
16. Клееная деревянная балка: патент на полезную модель № 197463 U1 Российская Федерация. № 2019136723 / В.В. Веселов, Ю.А. Беленцов, Л.Р. Куправа, П.С. Сидорова; заявл. 14.11.2019; опубл. 29.04.2020; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».
17. Конструкция усиления кирпичного простенка: патент № 2825240 С1 Российская Федерация, МПК Е04G 23/02. № 2024105714 / В.В. Веселов, А. И. Анцифиров; заявл. 04.03.2024; опубл. 22.08.2024; заявитель ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения имени Императора Александра I».
18. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции.

Дата поступления: 25.09.2024

Решение о публикации: 11.11.2024

Контактная информация:

ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — канд. техн. наук, доцент; veselov.1977@inbox.ru

Innovative ways to strengthen walls

V. V. Veselov

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

For citation: Veselov V. V. Innovative ways to strengthen walls. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 944–953. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-944-953

Abstract

Purpose: to analyze the possible use of composite materials to strengthen stone structures of walls and pillars, to investigate the possible reduction of material consumption and labor intensity of innovative reinforcement options while increasing reliability and durability. **Methods:** analysis of the advantages of hybrid structures used for their design of materials, calculation of design options using existing engineering techniques and using calculation programs. **Results:** traditional structural solutions for strengthening stone structures do not always have sufficient reliability and durability. The disadvantages of the known solutions are the increased material consumption of the reinforcement structure due to excessive consumption of concrete, steel, excessive increase in cross-section, as well as insufficient operational reliability of the reinforcement structure associated with corrosion wear of steel elements. A number of effective hybrid structures using composite materials have been developed at the Department of „Building Structures, Buildings and Structures“ of PSUPS. The construction of the reinforcement of the wall, protected by a patent for the invention, is proposed. The reinforcement design includes reinforcement elements installed and fixed in the reinforced structure with the ability to work together with it. The reinforcement elements are made in the form of rows of composite rods mounted on a polymer solution in the transverse seams of the brickwork and forming reinforced layers along the height of the reinforced structure. The reinforcement elements in the upper part of the reinforced structure are made of carbon fiber fabric glued to the surface of the brick wall along the entire contour. A constructive calculation of reinforcement options was performed, an analysis was made of reducing the weight of the structure, material consumption, labor intensity and other advantages of an innovative solution in comparison with traditional reinforcement structures of stone structures. **Practical significance:** the advantages of composite materials in strengthening stone structures are revealed. The innovative reinforcement design has a lower weight of 2,5–4 times, while reducing the cost by 10–30% compared to traditional designs and increasing durability. The proposed design solution can be rationally applied when reinforcing brick walls and pillars with an overload of up to 60–80%, and reinforcement can also be used to strengthen sections of walls damaged by sedimentary cracks.

Keywords: reinforcement, stone structures, walls, pillars, composite materials, polymers, carbon fiber, bearing capacity, durability

References

1. Veselov V., Talantova K. Gibrnidnye balochnye konstrukcii transportnyh sooruzhenij // Konspekty lekcij po setyam i sistemam 402 LNNS. 278 s. (In Russian)

2. Primenenie kompozitnyh materialov pri remonte mostovyh sooruzhenij / A. A. Belyj [i dr.] // Kompozitnye sistemy na ob'ektah podzemnogo i grazhdanskogo stroitel'stva: sbornik trudov I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, 27–28 sentyabrya 2018 goda). SPb.: Peterburgskij

gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2019. S. 47–54. (In Russian)

3. Egorov V.V., Abu-Hasan M.S., Veselov V.V. Armirovanie derevyannyh konstrukcij s ispol'zovaniem kompozitov iz nanouglerodnogo volokna // Kompozitnye sistemy na ob'ektah podzemnogo i grazhdanskogo stroitel'stva: sbornik trudov I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, 27–28 sentyabrya 2018 goda). SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2019. S. 107–113. (In Russian)

4. Dmitrenko E.A., Pochtar N.V. Osnovnye tipy defektov i povrezhdenij zhelezobetonnyh konstrukcij transportnyh sooruzhenij, prichiny ih vozniknoveniya // Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury. 2016. № 3 (119). S. 134–138. (In Russian)
5. Karapetov E. S., Belyj A. A. Ekspluatacionnaya nadezhnost' mostovyh sooruzhenij v surovyh klimati cheskih usloviyah // Putevoj navigator. 2020. № 43 (69). 2 s. (In Russian)
6. Prichiny i mekhanizmy povrezhdeniya shtukaturnogo pokrytiya fasadov istoricheskikh kamennyh zdanij / R. B. Orlovich [i dr.] // Sociologiya goroda. 2023. № 2. S. 59–77. DOI 10.35211/19943520_2023_2_59 (In Russian)
7. Gabrusenko V. V. Avarii, defekty i usilenie zhelezobetonnyh i kamennyh konstrukcij v voprosah i otvetah. 2-e izd., pererab. i dop. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet (Sibstrin), 2012. 124 s. (In Russian)
8. GOST 31937-2024. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya. (In Russian)
9. SP 427.1325800.2018. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Metody usileniya. (In Russian)
10. Grozdov V. T. Usilenie stroitel'nyh konstrukcij pri restavracii zdanij i sooruzhenij: uchebnik dlya vuzov. SPb., 2005. 114 s. (In Russian)
11. Ustrojstvo dlya usileniya nesushchih konstrukcij: patent na izobretenie № 2602840 C1 Rossijskaya Federaciya, E04G 23/02. № 2015149320/03 / A. A. Yurchenko; zayavl. 17.11.2015; opubl. 20.11.2016; zayavitel' FGAOU VO "Sibirskij federal'nyj universitet". (In Russian)
12. SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya. (In Russian)
13. Starcev S.A., Sundukova A.A. Usilenie kirpichnoj kladki kompozitnymi materialami i vintovymi sterzhnyami // Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij. 2014. № 6 (21). S. 17–31. (In Russian)
14. Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallets / E. Bernat-Maso [et al.] // Construction and Building materials. Spain, 2013. P. 3–13.
15. Metallokompozitnaya balka: patent na poleznuyu model' № 211900 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK E04C 3/06. № 2021136843 / V.V. Veselov, E.I. Nikonova; zayavl. 13.12.2021; opubl. 28.06.2022; zayavitel' FGBOU VO "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I". (In Russian)
16. Kleenaya derevyannaya balka: patent na poleznuyu model' № 197463 U1 Rossijskaya Federaciya. № 2019136723 / V.V. Veselov, Yu.A. Belencov, L.R. Kuprava, P.S. Sidorova; zayavl. 14.11.2019; opubl. 29.04.2020; zayavitel' FGBOU VO "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I". (In Russian)
17. Konstrukciya usileniya kirpichnogo prostenka: patent № 2825240 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK E04G 23/02. № 2024105714 / V.V. Veselov, A.I. Ancifirov; zayavl. 04.03.2024; opubl. 22.08.2024; zayavitel' FGBOU VO "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I". (In Russian)
18. SP 15.13330.2020. Kamennye i armokamennye konstrukcii. (In Russian)

Received: 25.09.2024

Accepted: 11.11.2024

Author's information:

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering, Associate Professor; veselov.1977@inbox.ru

УДК 621.391.8

Использование геопозиционирования объекта для повышения точности работы защиты питающих линий системы тягового электроснабжения

А. Ю. Сулимин, С. М. Куценко, М. А. Иванов

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

Для цитирования: Сулимин А. Ю., Куценко С. М., Иванов М. А. Использование геопозиционирования объекта для повышения точности работы защиты питающих линий системы тягового электроснабжения // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 954–964. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-954-964

Аннотация

Цель: ложные срабатывания на питающих линиях контактной сети при проезде изолирующего сопряжения приводят к появлению опасных ситуаций на железной дороге, например, отжигу и пережогу контактных проводов, возникновению электрической дуги. Также ложные отключения могут приводить к остановке подвижного состава на руководящем уклоне и тем самым снижать пропускную и провозную способности. Для решения проблемы, а именно исключения ложных срабатываний быстродействующих выключателей, в статье предлагается способ использования передатчиков GPS/ГЛОНАСС для усовершенствования устройств защиты на питающих линиях. **Методы:** исследование проводится на основе теоретических знаний о новых разработках, связанных с геопозиционированием подвижного состава, теории электрических и магнитных цепей и теории тягового электроснабжения. **Результаты:** сформулирована и изучена концепция загробления уставки устройств защиты питающих линий на основе данных о местоположении токоприемника на электроподвижном составе относительно изолирующего сопряжения. Также подробно расписаны все блоки комплекса устройств и принципы их действия. Построены графики изменения тока уставки быстродействующих выключателей, предложен вариант модернизации их конструкции для оперативного изменения тока уставки. **Практическая значимость:** результат работы имеет значение в первую очередь для обеспечения надежности, бесперебойной работы системы тягового электроснабжения и увеличения пропускной и провозной способностей. Представленная работа задает новое направление развития устройств защиты в системе тягового электроснабжения постоянного тока с использованием нового типа передаваемых данных — географического положения подвижного состава. Таким образом, работа демонстрирует возможность внедрения новых технологий определения положения объекта в систему релейной защиты контактной сети.

Ключевые слова: система геопозиционирования, повышение эффективности устройств защиты, система тягового электроснабжения, уставки защиты, быстродействующие выключатели, ложные срабатывания

Введение

В настоящее время в системе тягового электроснабжения (СТЭ) для филиала ОАО «РЖД» — «Трансэнерго» существует актуальная проблема — ложные срабатыва-

ния быстродействующих выключателей (БВ) при проезде изолирующего сопряжения (ИС) контактной сети. Ранее физические процессы были изучены во многих научных работах, например [1–5]. Для решения проблемы ложных срабатываний предлагается использовать систему геопозиционирования GPS/ГЛОНАСС для точного определения положения электроподвижного состава (ЭПС) относительно ИС для корректировки работы устройств защиты. При приближении ЭПС к ИС устройство, принимающее данные о положении ЭПС, создает необходимое воздействие для корректной работы БВ.

Около 95% всех срабатываний БВ при проезде ИС являются ложными [5, 6], поэтому можно считать, что дополнительная характеристика местоположения ЭПС на участке дороги позволит внести существенные коррективы в работу устройств защиты. Таким образом, при приближении поезда к ИС система автоматически будет предотвращать ложное срабатывание БВ. Также в случае отсутствия ЭПС вблизи ИС при появлении резкого «броска» тока в питающей линии (ПЛ), например при коротком замыкании (КЗ), защита будет работать в штатном режиме, без загробления уставки срабатывания. Это позволит ввести дополнительную селективность в работу защиты.

Общая часть

Проблема ложных срабатываний связана с резким переходом питания ЭПС от параллельных ПЛ1 и ПЛ2 к питанию только от ПЛ2 при прохождении ИС. В новом образовавшемся контуре постоянная времени переходного процесса после разрыва очень мала из-за низкого значения индуктивности контура. Этот параметр приводит к резкому нарастанию тока, величина и скорость такого

нарастания соизмеримы с характеристиками тока КЗ. Это инициализирует ложное срабатывание устройства защиты в ПЛ2, так как величина рабочего тока I_p и скорость его нарастания превышают ток уставки защиты I_y и уставку скорости срабатывания [1].

В связи с этим для корректной работы устройств защиты предлагается добавить в СТЭ следующие три блока: блок передачи данных, или передающее устройство (ПерУ), который устанавливается на ЭПС; блок-приемник, или приемное устройство (ПриУ), — на тяговой подстанции (ТП); исполняющее устройство (ИУ), которое будет воздействовать на устройства защиты (рис. 1).

При нахождении ЭПС в непосредственной близости от ИС система блокирует устройства защиты. Достигается блокировка путем изменения значения суммарной индуктивности шунта размагничивающего витка БВ. Подобный принцип описывается в [2], но имеет обратный эффект, когда добавление шунта снижает динамическую уставку защиты, ускоряя срабатывание БВ.

Таким образом, при изменении значения индуктивности шунта время достижения тока уставки увеличивается с t_{01} до t_{02} , изменяя верхний порог срабатывания защиты. На рис. 2 пунктирной линией изображен график тока уставки в штатном режиме, сплошной — при работе устройства.

Для корректной работы способа регулирования времени срабатывания БВ требуется информация о нахождении ЭПС на участке дороги относительно ИС. На данный момент существует способ определения положения ЭПС с помощью занятости рельсовых цепей (рис. 3).

Такой способ применяется для систем СЦБ, в которых занятость блок-участков позволяет регулировать движение поездов

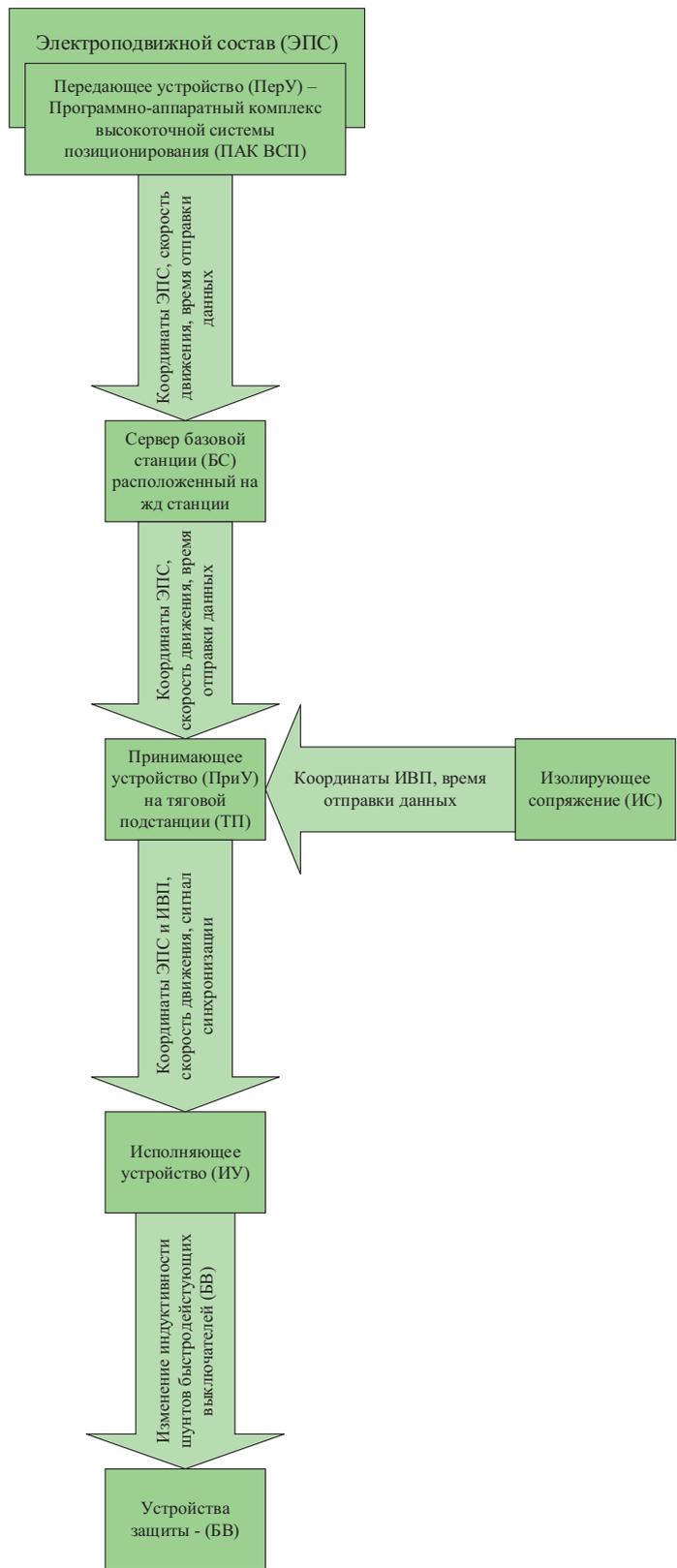


Рис. 1. Схема работы устройства регулирования времени достижения тока уставки защиты

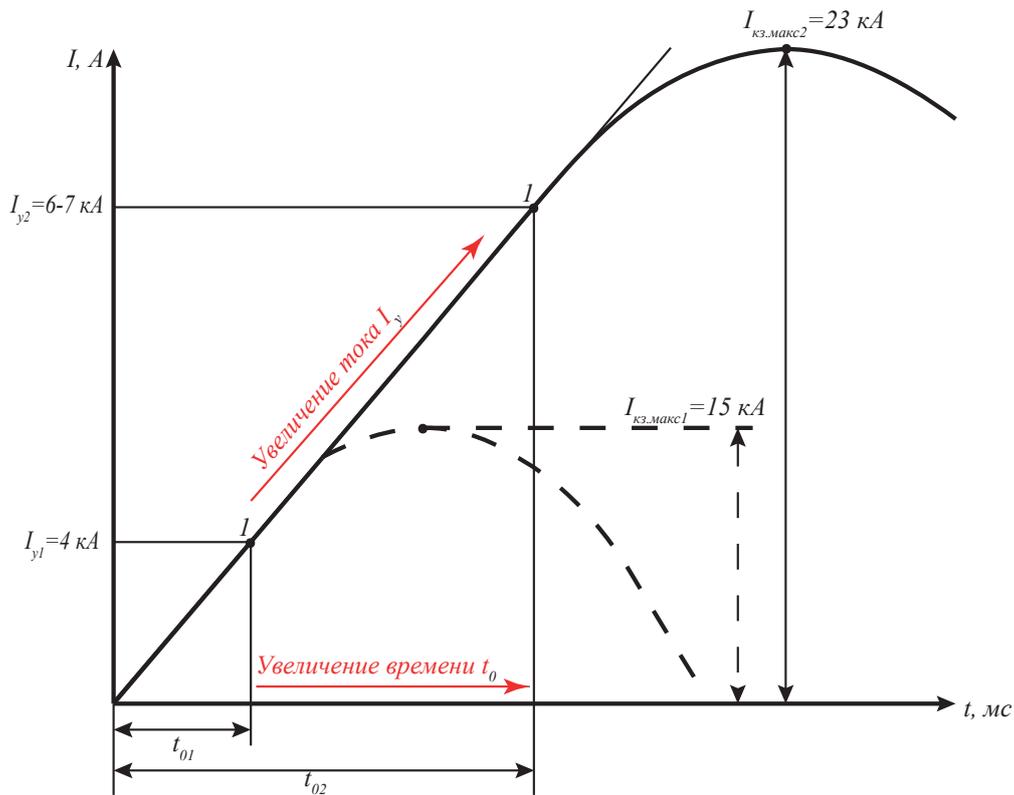


Рис. 2. Характеристика регулирования времени срабатывания БВ [2, стр. 24]:

t_{01}, t_{02} — время достижения тока уставки;

t_c — собственное время срабатывания выключателя;

t_r — время гашения дуги;

I_{y1}, I_{y2} — ток уставки защиты;

$I_{кз.макс1}, I_{кз.макс2}$ — максимальный ток короткого замыкания при срабатывании защиты

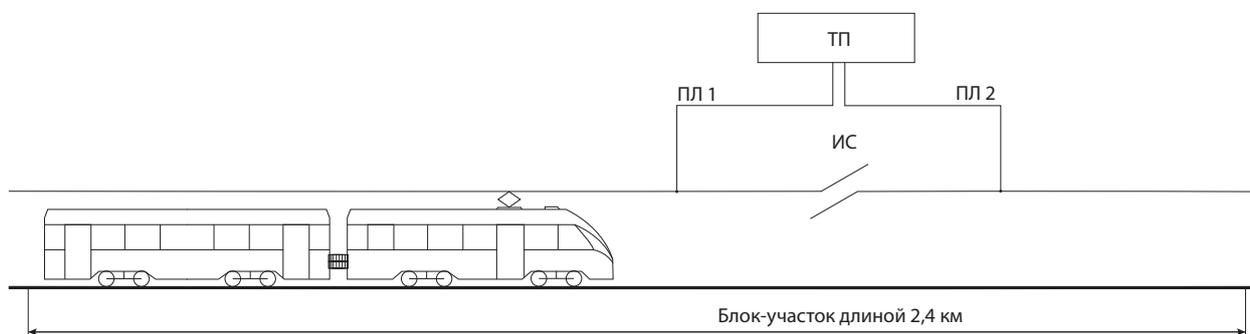


Рис. 3. Использование системы рельсовых цепей на блок-участках [7]:

ТП — тяговая подстанция; ПЛ — питающая линия;

ИС — изолирующее сопряжение

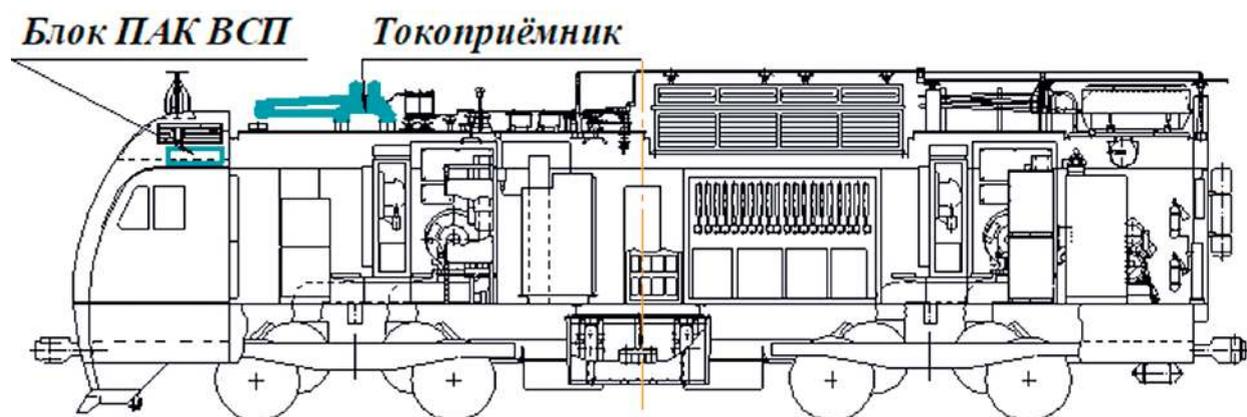


Рис. 5. Расположение блока ПАК ВСП и токоприемника на 2ЭС4К [11]

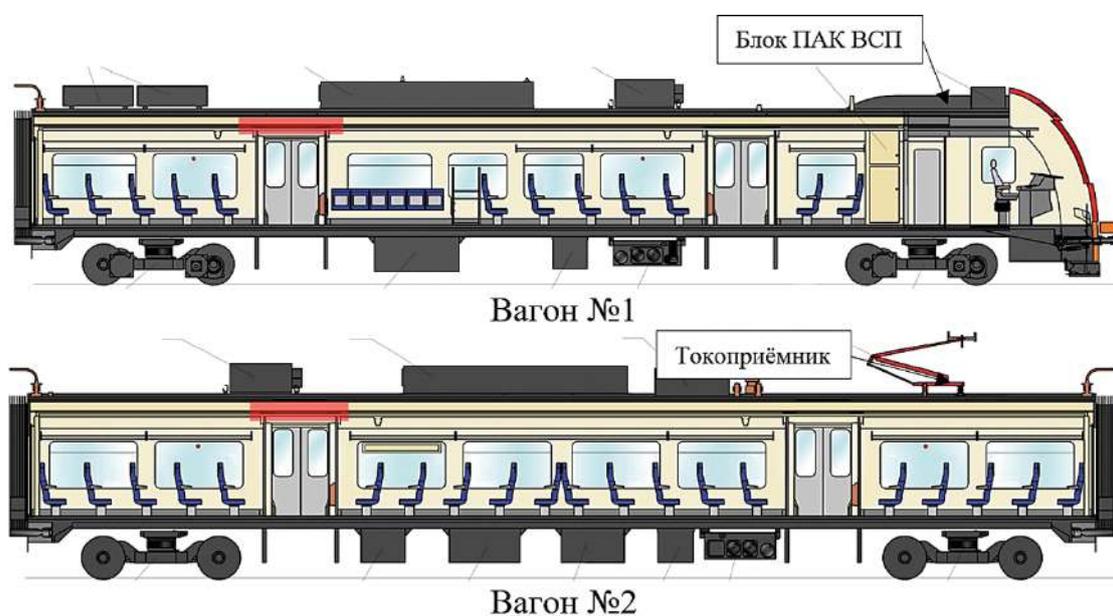


Рис. 6. Расположение блока ПАК ВСП и токоприемника на ЭС2Г [12]



Рис. 7. Расположение блока ПАК ВСП и токоприемника на ЭП20 [13]

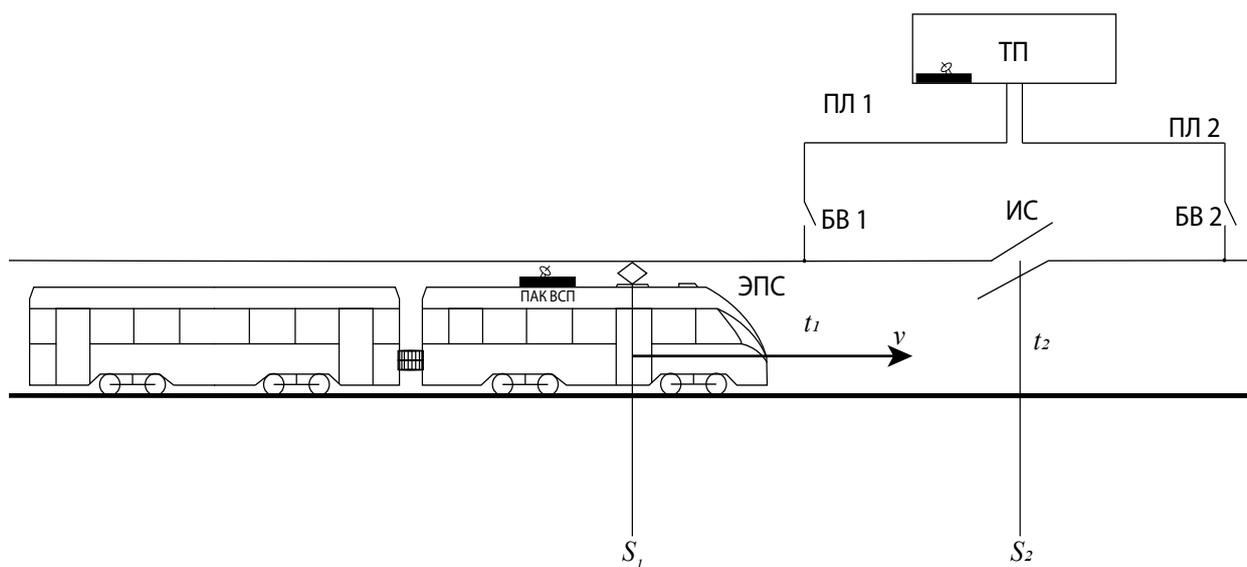


Рис. 8. Схематическое пояснение работы алгоритма исполняющего устройства:

- ТП — тяговая подстанция;
 ПЛ 1, ПЛ 2 — питающие линии;
 БВ 1, БВ 2 — быстродействующие выключатели;
 ИС — изолирующее сопряжение;
 ЭПС — электроподвижной состав;
 ПАК ВСП — программно-аппаратный комплекс высокоточной системы позиционирования;
 t_1 — время отправки данных с ЭПС;
 t_2 — время отправки данных с ТП;
 S_1 — координаты токоприемника ЭПС;
 S_2 — координаты ИС;
 v — скорость движения ЭПС

Таким образом, блок ПАК ВСП передает на ИУ следующие данные: координаты положения токоприемника с учетом корректирующего коэффициента; скорость движения ЭПС; время отправления данных. После попадания на сервер, расположенный на железнодорожной станции, данные отправляются на ближайшую по ходу движения ЭПС тяговую подстанцию. По значениям координат и скорости рассчитывается предполагаемое время проезда ИС. Данные о времени отправки обеспечивают синхронизацию работы

трех блоков. При этом также учитываются собственные временные затраты на передачу. После вычислений исполняющее устройство воздействует на БВ, изменяя динамическую уставку защиты.

Значение динамической уставки, как было сказано выше, зависит от индуктивности добавочного шунта РВ БВ. Изменение магнитного потока приводит к увеличению значения индуктивности шунта. Предлагаемый вариант модернизации схемы шунта РВ БВ изображен на рис. 10.

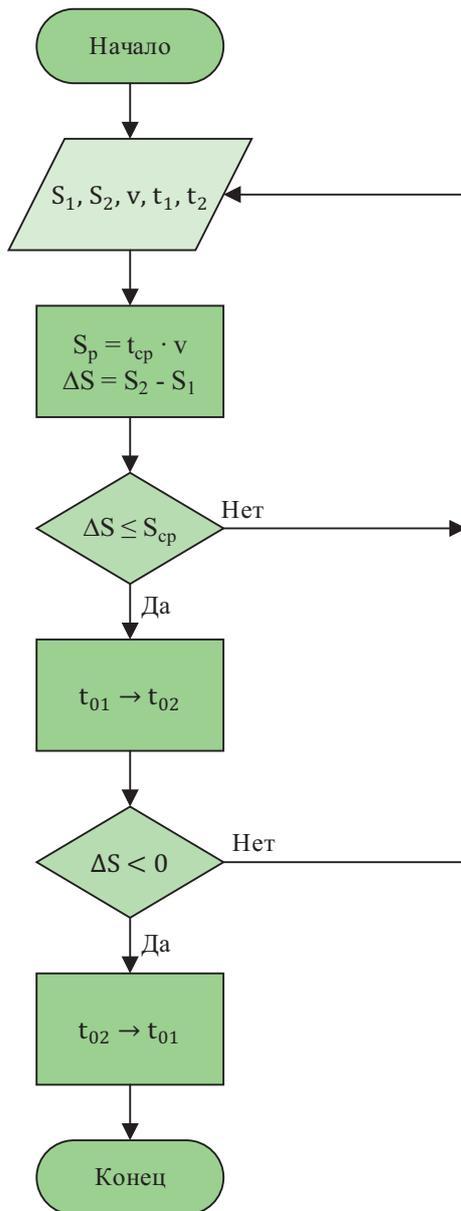


Рис. 9. Блок-схема работы исполняющего устройства:

- t_1 — время отправки данных с ЭПС;
- t_2 — время отправки данных с ТП;
- S_1 — координаты токоприемника ЭПС;
- S_2 — координаты ИС;
- v — скорость движения ЭПС;
- $S_{p.з}$ — расстояние, которое ЭПС проходит за время переключения уставки защиты;
- ΔS — расстояние от ЭПС до ИС;
- t_{01}, t_{02} — время достижения тока уставки

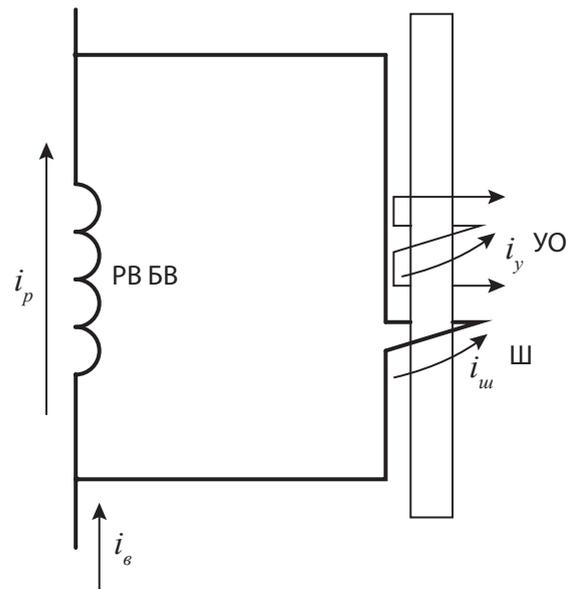


Рис. 10. Схема подключения шунта с управляемой обмоткой к размагничивающему витку БВ:

- РВ БВ — размагничивающий виток быстродействующего выключателя;
- Ш — индуктивный шунт;
- УО — управляемая обмотка;
- i_e — ток, проходящий через быстродействующий выключатель;
- i_p — ток размагничивающего витка;
- $i_{ш}$ — ток шунта;
- i_{oy} — ток управляемой обмотки

По формуле (1) магнитный поток управляемой обмотки:

$$\Phi = L \cdot I; L = \frac{\Phi}{I}, \quad (1)$$

где Φ — магнитный поток;

L — индуктивность;

I — ток в управляемой катушке.

При протекании тока через УО в шунте создается дополнительный магнитный поток. Сонаправленные магнитные потоки УО и Ш суммируются, увеличивая итоговое значение индуктивности шунта $L_{ит.ш}$ по формуле (1).

Также постоянная времени переходного процесса пропорциональна времени t_{01} , t_{02} из рис. 2:

$$\tau = \frac{L_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{L_{\text{шт.ш}}} + \frac{1}{L_{\text{рв}}}}$ — общая индуктивность

шунта и управляемой обмотки $L_{\text{шт.ш}}$ и РВ БВ ($L_{\text{бв}}$);

$R_{\text{общ}}$ — общее сопротивление.

При подаче тока управления время достижения тока уставки увеличивается с t_{01} до t_{02} согласно рис. 2.

Для нулевого значения тока управления индуктивность шунта выбирается по условиям уставки защиты в штатном режиме.

Заключение

Исследованный в статье метод регулирования уставки устройств защиты не изменяет исходную характеристику надежности БВ. При этом он предотвращает их ложные срабатывания, которые влекут за собой существенные нарушения функционирования и эффективности работы тяговой сети и подвижного состава.

Предложенное техническое решение позволяет повысить пропускную и провозную способности за счет отсутствия прерывания питания ЭПС от контактной сети. Благодаря исключению ложных срабатываний БВ при проезде ИС существенно снижаются денежные затраты на ремонт контактной сети, устройств электроснабжения и подвижного состава.

Результаты проведенного научного исследования открывают новые направления развития систем защиты в СТЭ с применением технологий геопозиционирования подвижного состава.

Библиографический список

1. Векслер М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания. М.: Транспорт, 1976. 120 с.
2. Хариков В. Ф. Защита контактной сети постоянного тока от коротких замыканий. М.: Транспорт, 1987. 95 с.
3. Фигурнов Е. П. Релейная защита: учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Желдориздат, 2002. 720 с.
4. Заторская Л. П. Проезд электровоза под током изолирующего воздушного промежутка тяговой сети постоянного тока // Наука и техника транспорта. 2018. № 3. 66 с.
5. Хусаинов Е. К. Повышение эффективности эксплуатации системы тягового электроснабжения за счет совершенствования устройств защиты контактной сети постоянного тока в вынужденных режимах: дисс. ... канд. техн. наук. Омск: ОмГУПС, 2021. 144 с.
6. Демиденко И. С. Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, 2013. 167 с.
7. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. трансп. / А. М. Брылеев [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1977. 376 с.
8. Комплекс высокоточной системы позиционирования. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/bortovye-kompleksy/programmno-apparatnyy-kompleks-vysokotochnoy-sistemy-pozitsionirovaniya/>
9. Программно-аппаратный комплекс высокоточного позиционирования транспортного средства (ПАК ВТП ТС): патент РФ № 2803992 / Е. П. Горелик [и др.]. 2022.
10. Тяговые подстанции: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Ю. М. Бей [и др.]. М.: Транспорт, 1986. 310 с.
11. Электровоз 2ЭС4К: руководство по эксплуатации. Кн. 2. Описание и работа. Компонировка оборудования. Монтаж электрический. Система вентили-

ляции. ИДМБ.661141.004 РЭ2 (ЗТС.000.003 РЭ2). Новочеркасск, 2006. 50 с.

12. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г: руководство по эксплуатации ЭС2Г.0.00.000.000 РЭ. ООО «Уральские локомотивы», 2014. 297 с.

13. Индикация и стабилизация напряжения блок электроники / А. Д. Шнайдер [и др.] // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. 252 с.

14. Аржанников Б. А. Основные положения трехфазной системы электрической тяги: монография. Екатеринбург: УрГУПС, 2023. 263 с.

Дата поступления: 09.10.2024

Решение о публикации: 18.11.2024

Контактная информация:

СУЛИМИН Артем Юрьевич — студент 5-го курса группы ЭС-004 факультета АиТ;

sulimin.artem@gmail.com

КУЦЕНКО Сергей Михайлович — канд. техн. наук, доцент, декан факультета безотрывных форм

обучения; kutsenko@pgups.ru

ИВАНОВ Михаил Александрович — старший преподаватель кафедры «Электроснабжение железных дорог»; m-a-ivanov@yandex.ru

The use of the object geopositioning for the increase of the accuracy of the protection operation of the supply lines of the traction power supply system

A. Yu. Sulimin, S. M. Kutsenko, M. A. Ivanov

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

For citation: *Sulimin A. Yu., Kutsenko S. M., Ivanov M. A.* The use of the object geopositioning for the increase of the accuracy of the protection operation of the supply lines of the traction power supply system // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 954–964. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-954-964

Abstract

Purpose: false tripping on the supply lines of the contact network when passing an insulating interface leads to dangerous situations on the railroad, e.g. annealing and burning of contact wires, arcing. Also false disconnections can lead to stoppage of rolling stock on the guiding gradient and, thus, reduce throughput and transportation capacity. To solve the problem, namely to exclude false tripping of fast-acting switches, the paper proposes a method of using GPS/GLONASS transmitters to improve protection devices on supply lines. **Methods:** the research is carried out on the basis of theoretical knowledge of new developments related to geopositioning of rolling stock, theory of electric and magnetic circuits and theory of traction power supply. **Results:** this paper formulates and studies the concept of loading the set point of feeder line protection devices based on the data of current collector location on the electric rolling stock relative to the isolating coupling. Also each block of the complex of devices and principles of their operation are described in detail. The graphs of change of current setting of fast-acting switches are constructed and the variant of modernization of their design for operative change of current setting is offered. **Practical significance:** the result of the work is of importance, first of all, for ensuring reliability, uninterrupted operation of the traction power supply system and increasing the throughput and carrying capacity. The presented work sets a new direction for the development of protection devices in the DC traction power supply system using a new type of transmitted data – the geographical position of the rolling stock. Thus, the work demonstrates the

possibility of introducing new technologies for determining the position of the object in the relay protection system of the contact network.

Keywords: ge positioning system, increasing the efficiency of protection devices, traction power supply system, protection setpoints, high-speed circuit breakers, false alarms

Reference

1. Veksler M.I. Zashchita tyagovoj seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo zamykaniya. M.: Transport, 1976. 120 s. (In Russian)
2. Harikov V.F. Zashchita kontaktnoj seti postoyannogo toka ot korotkih zamykanij. M.: Transport, 1987. 95 s. (In Russian)
3. Figurnov E.P. Relejnaya zashchita: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp. M.: Zheldorizdat, 2002. 720 s. (In Russian)
4. Zatorskaya L.P. Proezd elektrovoza pod tokom izoliruyushchego vozdušnogo promezhutka tyagovoj seti postoyannogo toka // Nauka i tekhnika transporta. 2018. No. 3. 66 s. (In Russian)
5. Husainov E.K. Povyshenie effektivnosti ekspluatsii sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet sovershenstvovaniya ustrojstv zashchity kontaktnoj seti postoyannogo toka v vyzhdenykh rezhimakh: diss. ... kand. tehn. nauk. Omsk: OmGUPS, 2021. 144 s. (In Russian)
6. Demidenko I.S. Povyshenie effektivnosti zashchity tyagovoj seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tehn. nauk. Novosibirsk: NGTU, 2013. 167 s. (In Russian)
7. Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp / A. M. Bryleev [i dr.]. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Transport, 1977. 376 s. (In Russian)
8. Kompleks vysokotochnoj sistemy pozicionirovaniya. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/bortovye-kompleksy/programmno-apparatnyj-kompleks-vysokotochnoy-sistemy-pozitsionirovaniya/> (In Russian)
9. Programmno-apparatnyj kompleks vysokotochnogo pozicionirovaniya transportnogo sredstva (PAK VTP TS): patent RF № 2803992 / E. P. Gorelik [i dr.] 2022. (In Russian)
10. Tyagovye podstancii: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp. / Yu. M. Bej [i dr.]. M.: Transport, 1986. 310 s. (In Russian)
11. Elektrovoz 2ES4K: rukovodstvo po ekspluatsii. Kn. 2. Opisanie i rabota. Komponovka oborudovaniya. Montazh elektricheskij. Sistema ventilyacii. IDMB.661141.004 RE2 (3TS.000.003 RE2). Novochebkersk, 2006. 50 s. (In Russian)
12. Elektropoezd s asinhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G: rukovodstvo po ekspluatsii ES2G.0.00.000.000 RE. OOO "Ural'skie lokomotivy", 2014. 297 s. (In Russian)
13. Indikaciya i stabilizaciya napryazheniya blok elektroniki / A.D. Shnajder [i dr.] // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo". 2018. 252 s. (In Russian)
14. Arzhannikov B.A. Osnovnye polozheniya trekhfaznoj sistemy elektricheskoy tyagi: monografiya. Ekaterinburg: UrGUPS, 2023. 263 s. (In Russian)

Received: 09.10.2024

Accepted: 18.11.2024

Author's information:

Artyom Yu. SULIMIN — 5th year Student of group ES-004 of the Faculty of AiT;

sulimin.artem@gmail.com

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

Mikhail A. IVANOV — Senior Lecturer of the Department "Electrical power supply of railroads"; m-a-ivanov@yandex.ru

УДК 69.001.5

Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах

Я. В. Мельник¹, А. Э. Федоров²

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

² ООО СК «Мостотрест», Россия, 236006, Калининград, Правая набережная, 10

Для цитирования: Мельник Я. В., Федоров А. Э. Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 965–972. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-965-972

Аннотация

Цель: поиск рационального способа строительства подводного тоннеля в условиях плотной городской застройки при ширине русла водного препятствия порядка 200 м в несвязанных илистых грунтах, который обеспечит минимальную глубину заложения тоннеля без дополнительных и дорогостоящих мер по укреплению окружающего грунтового массива. Рассмотрен вопрос сооружения пересечений в разных уровнях, строительство которых в последнее время значительно выросло из-за увеличения объемов строительства автомобильных магистралей в рамках расширения транспортной сети городов. **Методы:** проанализированы существующие способы сооружения городских подводных тоннелей в слабых грунтах и выявлено, что ни один из них не является рациональным в данных условиях. Местом исследования выбран перспективный створ реки Преголь в городе Калининграде, строительство тоннеля в этом створе обеспечит не только увеличение пропускной способности магистрали, но и проезд грузовых потоков. **Практическая значимость:** разработана технология поэтапного сооружения подрусловой части подводных тоннелей способом продавливания секций под дном водотока без предварительной разработки грунта, не имеющая аналогов в отечественном тоннелестроении.

Ключевые слова: подводный городской тоннель, илистые грунты, продавливание, опускные секции, рабочий орган

Введение

Развитие транспортной системы Российской Федерации — одно из приоритетных направлений государственной поддержки, не только обеспечивающее жизнедеятельность общества, но и непосредственно влияющее на социально-экономическое развитие и безопасность страны в целом. В крупных городских агломерациях для устойчивого совершенствования транспортной системы требуется ее опережающее развитие относительно других отраслей народного хозяйства. Транспортная система города сегодня

— это разветвленная сеть дорог различного назначения, обеспечивающая бесперебойное, безопасное и эффективное перемещение в пространстве людей и грузов, а также внедрение скоростных, высокопроизводительных и экологически чистых видов транспорта [1].

Рассмотрим вопрос сооружения пересечений в разных уровнях, строительство которых в последнее время значительно увеличилось из-за роста объемов строительства автомобильных магистралей при

расширении транспортной сети городов. Целью исследования был поиск рационального способа строительства подводного тоннеля в условиях плотной городской застройки при ширине русла водного препятствия порядка 200 м в несвязанных илистых грунтах.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Анализ существующих способов строительства подводных тоннелей в слабых грунтах.

2. Разработка технологии строительства городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах.

На первом этапе исследования проанализированы различные варианты проходки подводного тоннеля с точки зрения возможных рисков при строительстве в городских условиях.

При горном способе сооружения тоннелей основная сложность будет заключаться в разработке обводненного грунта, требующего специальных мер по обеспечению устойчивости пород в процессе проходки тоннеля. Так, при строительстве совмещенного тоннеля «Адлер — горноклиматический курорт «Альпака Сервис» потребовалось применение дорогостоящих специальных способов закрепления грунтов, обеспечивающих безопасность ведения работ. Применялось несколько способов закрепления грунтов: сооружение опережающего свода из труб, устройство грунтоцементных свай по технологии Jet-Grouting, применение фиброглассовых и самозабуривающихся анкеров [8].

Проектирование поперечного сечения тоннеля с четырьмя полосами движения, сооружаемого горным способом, повлечет за собой значительное увеличение пролета сооружаемой конструкции и, как следствие, снижение устойчивости лба забоя и необходимость зна-

чительного заглубления тоннеля, что, в свою очередь, приводит к трудности расположения рамповых участков в плотной городской застройке [4].

При щитовой проходке для сооружения тоннеля в данных инженерно-геологических условиях необходимо учитывать, что при незначительной длине подрусовой части длина тоннелепроходческого механизированного комплекса с сечением на четыре полосы (диаметром 12–14 м) составляет порядка 200 м. Это приводит к значительным затратам на строительство стартового и приемного котлованов, требующих применения дорогостоящих ограждений. Также потребуется применение специальных щитов с гидро- или бентонитовым пригрузом забоя, обеспечение значительного в заданных инженерно-геологических условиях защитного слоя вышележащих грунтов. Аналогично горному способу возникают сложности в сооружении рамповых участков из-за увеличения глубины и, как следствие, длины тоннеля, а также во встраивании их в уже существующую транспортную сеть города [3, 7].

Применение способа опускных секций в несвязанных глинистых грунтах, обеспечивающего нам минимальную глубину заложения, невозможно без дополнительного крепления грунтов дна водотока либо его частичной замены. Необходимо устройство специального основания, на которое будут опираться секции, чтобы избежать неравномерных осадков в процессе эксплуатации [9]. Кроме того, в процессе устройства подводной траншеи для установки секции необходимо будет частичное укрепление грунтов для обеспечения устойчивости откосов, что влечет за собой большие трудозатраты и увеличение материалоемкости [2].

Анализ существующих способов сооружения подводных тоннелей показывает, что, на наш взгляд, ни один из них не является рациональным в данных геологических условиях, поэтому мы предлагаем разработать новый способ строительства подводных тоннелей, который обеспечит минимальную глубину заложения без дополнительных дорогостоящих мер по укреплению грунтов.

Описание места исследования

Местом исследования выбран створ реки Преголь в городе Калининграде, в районе двухъярусного моста. Он перспективен для строительства автодорожного подводного тоннеля, который продублирует существующее мостовое пересечение и обеспечит не только увеличение пропускной способности магистрали, но и проезд грузовых автомобилей.

Геология участка проектирования представлена отложениями четвертичной системы: техногенные и аллювиальные образования, ледниковые отложения. Грунты, слагающие дно водотока, представляют собой глинистые илы, модуль деформации (E) которых находится в пределах 1–5 МПа. Данные грунты относятся к разновидности «очень сильно деформируемые».

Описание способа продавливания тоннельных секций с использованием направляющих, без предварительной разработки грунта

Разработанный новый способ строительства тоннелей описывается основными этапами, которые необходимо выполнить для сооружения подрусловой части тоннеля.

На первом этапе строительства (рис. 1) устраиваются стартовый и приемный котлованы с установкой шпунтового ограждения, с распорной и обвязочной системой, выполненной из труб и балок соответственно.

На втором этапе устраивается свайное основание, которое будет предотвращать опрокидывание ростверков и уменьшит перемещение основания из труб в процессе эксплуатации.

На третьем этапе строится специальная металлическая стартовая камера (рис. 2), которая впоследствии станет ограждающим элементом котлована и будет обеспечивать защиту от прорыва ила в процессе продавливания секций.

Также на данном этапе производства работ устраивается стапель для бетонирования секции и устройства накаточных путей.

На четвертом этапе строительства проводятся проходческие работы по устройству

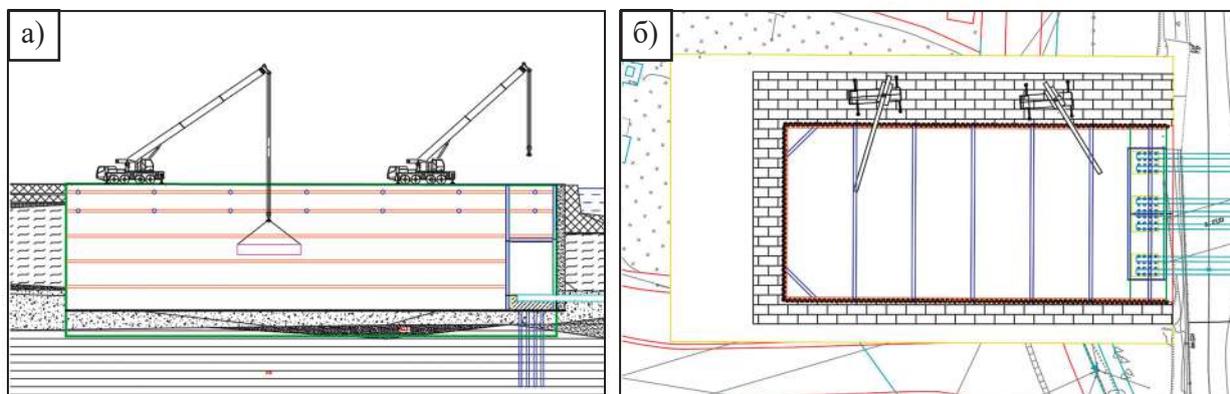


Рис. 1. Первый этап

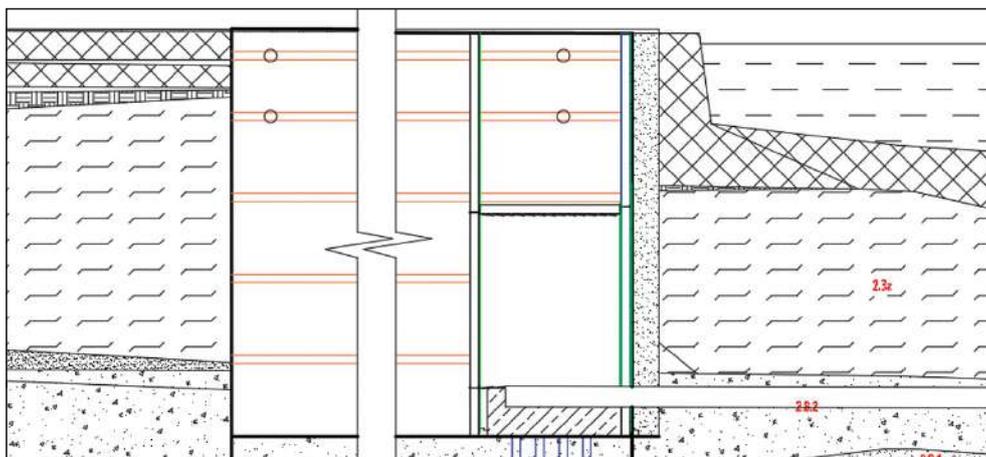


Рис. 2. Устройство стартовой камеры (этап 3)

направляющих из труб при помощи микрошита. После устройства труб необходимо увязать их со свайным основанием, предварительно распушив оголовки свай, которые были установлены на втором этапе, и нарастив арматурный каркас.

На пятом этапе строительства устраиваются железобетонные ростверки, в которые будут заанкериваться трубы. Заанкеривание труб производится таким образом, чтобы часть трубы высотой 100 мм была вне ростверка, для установки продавливаемой секции сразу на них.

На шестом этапе производства работ устраивается герметичная стартовая камера для ведения работ по продавливанию секций. Также внутри данной камеры необходимо устроить многорядные замкнутые резиновые прокладки, которые будут препятствовать проникновению воды и ила в котлован путем плотного облегания секции при ее продавливании.

На седьмом этапе строительства производится установка гидравлических домкратов в проектное положение, а также устройство дополнительного оборудования для их обслуживания. Количество домкратов, которое

необходимо для продавливания секций, определяется расчетом. Домкраты, которые возможно использовать для продавливания, развивают усилие до 1000 т/с (модель домкрата ДГ1000М300).

На восьмом этапе необходимо произвести подготовительные работы для продавливания секции (рис. 3): проверить готовность домкратов и оборудования, закрыть торец секции, проверить работоспособность накаточных путей и их тормозные устройства, а также резиновые прокладки стартовой камеры на наличие дефектов. Кроме того, на подготовительном этапе следует заполнить сервисные отсеки внутри секции балластом для обеспечения отрицательной плавучести конструкции.

После продавливания первой секции на стапеле бетонируется вторая секция, повторяя пятый этап. Когда вторая секция будет подготовлена к продавливанию, необходимо ее переместить к первой секции так, чтобы расстояние между ними было 50–60 см, и устроить стыковочный шов для обеспечения герметичности и целостности в процессе эксплуатации тоннельного пересечения (рис. 4).

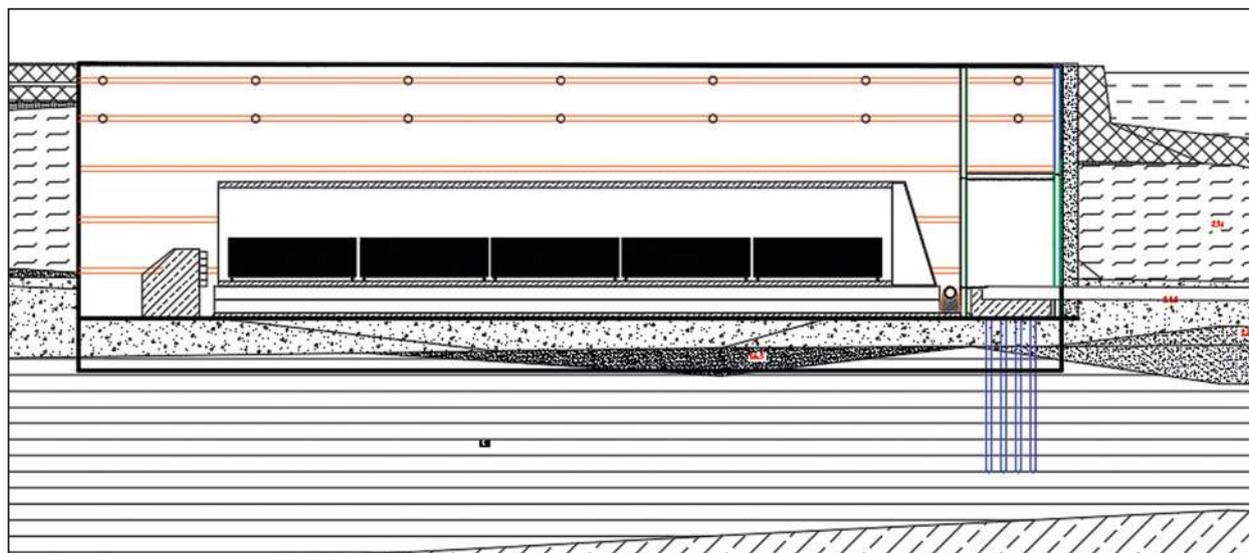


Рис. 3. Устройство котлована (этап 8)

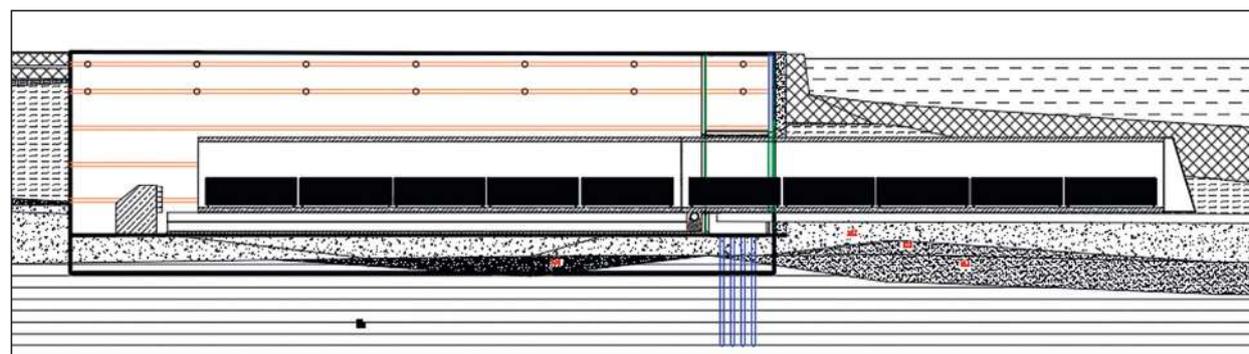


Рис. 4. Устройство деформационного шва (этап 9)

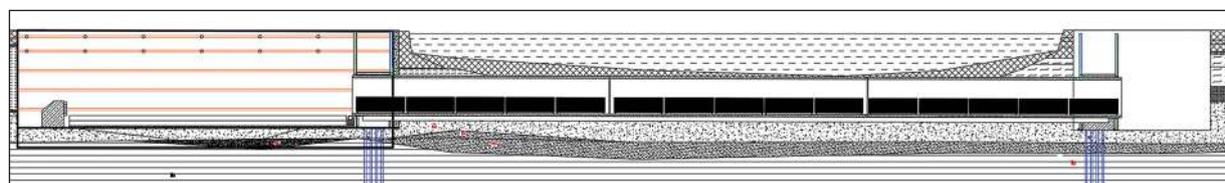


Рис. 5. Сооруженная подрусловая часть тоннеля (этап 10)

На десятом этапе повторяются процессы этапов 5, 8, 9, то есть происходят бетонирование третьей секции и ее подготовка (рис. 5). На противоположном правом берегу уже должна быть готова приемная камера, аналогичная

стартовой. После того как приемный котлован будет готов для приема первой секции, необходимо вести продавливание.

После установки подрусловой части тоннеля в проектное положение требуется

убрать балласт из сервисных отсеков, предварительно установив на тоннель бетонные плиты для увеличения отрицательной плавучести и обеспечения плотного прилегания тоннеля к трубам.

Результаты работы

Был выполнен сравнительный анализ существующих способов сооружения подводных тоннелей в условиях сложения дна водотока несвязанными илами. Все проанализированные способы требуют значительного заглубления тоннеля и применения специальных мер по укреплению грунта, что подчеркивает сложность и многообразие задач в области современного тоннелестроения.

Разработан новый способ строительства подводных городских тоннелей небольшой протяженности в сильно деформируемых несвязанных обводненных илистых грунтах. В поперечном сечении автодорожный тоннель в его подводной части представляет собой монолитную конструкцию с размерами секции 28,3 м шириной и 8,8 м высотой. Суммарная длина продавливаемых участков составляет 151 м.

Вывод

Разработанный способ сооружения подводных тоннелей небольшой длины в несвязанных илистых грунтах обеспечивает глубину заложения тоннеля 1,5–2 м, что приводит к его минимальной длине и делает этот способ конкурентоспособным по сравнению с другими способами строительства. Также при такой глубине заложения появляется больше возможностей вписать пересечения в уже сложившуюся транспортную сеть крупных городов и значительно расширить область строительства подводных тоннелей. Отсутствие специальных мер по укреплению

грунтов дна водотока существенно снижает трудоемкость этого способа и, соответственно, капитальные затраты.

Проведенное исследование подтверждает возможность использования предложенного способа, однако необходимо провести оценку напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив — сооружение» по данным геотехнического расчета и разработать мероприятия по снижению лобового сопротивления и сопротивления по боковой поверхности конструкции при продавливании.

Библиографический список

1. Дудкин Е.П., Лосин Л.А., Мельник Я.В. Транспортные системы страны, ее регионов и городов. СПб.: ПГУПС, 2021. 54 с.
2. Маковский Л.В., Кравченко В.В. Подводные транспортные тоннели из опускных секций: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2016. С. 74–78.
3. Механизированная проходка тоннелей в городских условиях. Методология проектирования и управления строительством / В. Гульелмети [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 421–432; 467–476.
4. Чан Вай Лой. Обоснование конструктивно-технологических параметров при строительстве тоннелей методом продавливания в условиях Вьетнама: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2019. С. 44–49.
5. Фролов Ю.С., Сокорнов А.А. Сооружение тоннелей горным способом: учебное пособие. СПб., 2020. С. 4–18.
6. Сокорнов А.А., Коньков А.Н. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов // Путевой навигатор. 2022. № 50(76). С. 36–44.
7. Транспортный переход через пролив Невельского — мост или тоннель? / Е. Б. Шестакова [и др.] // Путевой навигатор, 2019. № 39(65). С. 46–59.
8. Королько С.Н. Технологии и обеспечение безопасности ведения подземных работ при про-

ходке тоннелей на совмещенной дороге «Адлер — Горноклиматический курорт “Альпика-Сервис”» // Метро и тоннели. 2010. № 4. С. 30–33.

9. Курбацкий Е. Н., Сеницын А. С. Конструктивно-технологические решения протяженных переходов через проливы, сложенные слабыми грунтами по дну на территориях расчлененных ландшафтов // Перспективы развития строительного комплекса. 2015. № 1. С. 248–254.

Дата поступления: 14.09.2024

Решение о публикации: 01.11.2024

Контактная информация:

МЕЛЬНИК Яна Владленовна — канд.

техн. наук, доцент;

melnik-yana@yandex.ru

ФЕДОРОВ Андрей Эдуардович — инженер;

rtut199922@mai.ru

Method of underwater urban tunnels construction in unrelated silty soils

Ia. V. Melnik¹, A. E. Fiodorov²

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

² “SK “Mostotrest“ LLC, 10, Pravaya Naberezhnaya, Kaliningrad, 236006, Russia

For citation: Melnik Ia. V., Fiodorov A. E. Method of underwater urban tunnels construction in unrelated silty soils // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 965–972. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-965-972

Abstract

The purpose: to find a rational way to build an underwater tunnel in the dense urban development conditions, with the channel width of about 200 m, in unrelated silty soils, that will ensure the minimum depth of the tunnel without additional and expensive measures to strengthen the surrounding soil massive. The article considers the construction of road intersections at different levels, the construction of which has recently increased significantly due to the increase in the volume of highway construction as part of the urban transport network expansion. **Methods:** the article analyzes the existing methods of constructing urban underwater tunnels in weak soils, and reveals that none of them is rational under these conditions. A promising section of the Pregol River in Kaliningrad was chosen as the site of the study, the construction of a tunnel in this section will ensure not only an increase in the capacity of the highway, but also the passage of cargo flows. **Practical significance:** a technology has been developed for the phased construction of the subsurface part of underwater tunnels by pushing sections under the bottom of a watercourse without preliminary excavation, which has no analogues in the national tunneling industry.

Keywords: underwater urban tunnel, weak silty soils, pushing, immersed sections, operating element

References

1. Dudkin E.P., Losin L.A., Mel'nik Ya.V. Transportnye sistemy strany, ee regionov i gorodov. SPb.: PGUPS, 2021. 54 s.

2. Makovskij L. V., Kravchenko V. V. Podvodnye transportnye tonneli iz opusknyh sekcij: uchebnoe posobie. M.: KNORUS, 2016. S. 74–78.

3. Mekhanizirovannaya prohodka tonnelej v gorodskih usloviyah. Metodologiya proektirovaniya i upravleniya stroitel'stvom / V. Gul'elmetti [i dr.]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. S. 421–432; 467–476.

4. Chan Vaj Loj. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov pri stroitel'stve tonnelej

metodom prodavlivaniya v usloviyah V'etnama: diss. ... kand. tehn. nauk. M., 2019. S. 44–49.

5. Frolov Yu.S., Sokornov A.A. Sooruzhenie tonnelej gornym sposobom: uchebnoe posobie. SPb., 2020. S. 4–18.

6. Sokornov A.A., Kon'kov A.N. Modelirovanie prohodki tonnelya glubokogo zalozeniya v metode konechnyh elementov // Putevoj navigator. 2022. No. 50(76). S. 36–44.

7. Transportnyj perekhod cherez proliv Nevel'skogo — most ili tunnel'? / E. B. SHestakova [i dr.] // Putevoj navigator. 2019. № 39(65). S. 46–59.

8. Korol'ko S. N. Tekhnologii i obespechenie bezopasnosti vedeniya podzemnyh rabot pri prohodke tonnelej na sovmeshchennoj doroge “Adler —

Gornoklimaticheskij kurort “Al'pika-Servis” // Metro i tonneli. 2010. No. 4. S. 30–33.

9. Kurbackij E.N., Sinicyn A.S. Konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya protyazhennyh perekhodov cherez prolivy, slozhennye slabymi gruntami po dnu na territoriyah raschlenennyh landshaftov // Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa. 2015. No. 1. S. 248–254.

Received: 14.09.2024

Accepted: 01.11.2024

Author's information:

Iana V. MELNIK — PhD, Associate Professor;
melnik-yana@yandex.ru

Andrey E. FIODOROV — engineer; rtut199922@mai.ru



УДК 004.056.2

Программа визуализации результатов оценки и анализа качества функционирования IP-сети в условиях воздействия кибератак

А. А. Привалов³, Д. Д. Титов^{1,2}, А. И. Толстихин²

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

² ОАО «Супертел», Россия, 197101, Санкт-Петербург, Петроградская наб., 38А

³ Академия войск национальной гвардии, Россия, 198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, 1

Для цитирования: Привалов А. А., Титов Д. Д., Толстихин А. И. Программа визуализации результатов оценки и анализа качества функционирования IP-сети в условиях воздействия кибератак // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 973–980. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-973-980

Аннотация

Цель: разработка программного обеспечения, которое способно визуализировать работу телефонной IP-сети в условиях кибератак, используя предложенную в научной статье математическую модель. Программа должна обеспечивать глубокий анализ воздействия атак на производительность сети, а также предоставлять результаты в удобной для интерпретации графической форме. **Методы:** для достижения целей использовались методы математического анализа. Основные математические модели включают уравнения для расчета распределения воздействия, времени восстановления и других параметров сети. Программа применяет численное интегрирование и дифференцирование для расчета распределения времени обслуживания. Программа использует гамма-распределение для расчета функции доведения пакетов с данными с заданным качеством. В качестве функций распределения случайных параметров потоков данных использовались распределения Пуассона, Вейбулла и Парето. **Результаты:** программа позволяет моделировать различные сценарии кибератак и их воздействие на основные показатели сети, анализировать такие характеристики, как время доведения, вероятность потери пакетов и устойчивость сети. Результаты анализа показывают, как различные виды воздействий и параметры восстановления влияют на функционирование сети, что позволяет оператору оценить эффективность различных методов защиты и повреждений. **Практическая инновационность:** результаты, полученные в ходе технологического моделирования, могут быть использованы для повышения устойчивости и надежности телекоммуникационных систем, особенно тех, которые работают на оборудовании ОАО «Супертел». Программа предоставляет операторам инструмент для анализа состояния сети, разработки превентивных мер и оптимизации стратегий восстановления после удара. Она также может быть интегрирована в систему поддержки принятия решений и использоваться для выявления случаев несанкционированного доступа.

Ключевые слова: кибератака, IP-сеть, математическое моделирование, функции распределения, счетное интегрирование устойчивости сети, оборудование ОАО «Супертел»

Введение

В современном мире к системам цифровой связи предъявляются высокие требования по таким параметрам, как скорость передачи данных, надежность доведения информации и устойчивость к кибератакам. Телефонные IP-сети, используемые для передачи голосовых,

видео и текстовых данных, особенно подвержены угрозам, таким как DDoS-атаки на доступность сервисов и другие виды кибератак. Эффективная защита и восстановление таких сетей требуют использования сложных математических моделей и инструментов для анализа и визуализации киберугроз [1, 2, 3].

Разработанная часть программного обеспечения предоставляет возможность симулировать работу телефонной IP-сети, функционирующей на оборудовании компании ОАО «Супертел», в условиях кибератак. Оборудование компании ОАО «Супертел» является основой многих телекоммуникационных систем, и его широкое использование делает критически важным понимание и оценку последствий кибератак на такие сети [4, 6, 8].

Модель, предложенная в статье *Evaluating the Functioning Quality of Data Transmission Networks in the Context of Cyberattacks*, представляет собой мощный инструмент для оценки качества функционирования сетей передачи данных в условиях внешних угроз. Используя основные параметры модели, такие как среднее время восстановления сети после атаки (t_{AvRes}), интенсивность атак ($Y_{attack1}$, $Y_{attack2}$) и дисперсия времени реализации атак (DD_{r1} , DD_{r2}), можно построить точную картину воздействия атак на IP-сети. Однако для практического использования этих данных необходимо создать удобные и понятные инструменты для визуализации, которые позволят операторам сетей и аналитикам быстро и эффективно принимать решения по повышению устойчивости сети [5, 7, 8, 11, 13].

В данной статье описывается фрагмент программного обеспечения АРМ должностного лица дирекции связи, который имитирует процесс функционирования IP-сети в условиях кибератак. Этот фрагмент позволяет оценить устойчивость сети, проанализировать влияние различных типов атак и разработать стратегии

по их предотвращению и устранению. Использование этого инструмента также полезно для исследования и анализа качества функционирования IP-сетей, построенных на оборудовании ОАО «Супертел», что позволяет более эффективно проводить тестирование и повышать общую надежность сети.

Актуальность и значимость исследования

С увеличением объема передаваемых данных и числа подключенных устройств телефонные IP-сети становятся все более сложными и уязвимыми для различных угроз. В связи с этим возрастает необходимость использования современных инструментов для анализа и защиты таких сетей от кибератак. Телефонные IP-сети, построенные на оборудовании ОАО «Супертел», широко распространены в России, обеспечивая связь для различных организаций, включая государственные структуры и крупные предприятия.

Исследования, подобные работе *Evaluating the Functioning Quality of Data Transmission Networks in the Context of Cyberattacks*, показывают важность глубокого анализа параметров сети в условиях атак. Модель, предложенная в этой статье, позволяет оценивать, как различные виды атак влияют на задержки в сети, потери данных, восстановление после сбоев и другие важные параметры. Однако для эффективного применения этих знаний на практике требуется удобный инструмент для анализа и визуализации данных, который сможет учитывать все особенности конкретной сети и предоставлять результаты в удобной форме.

Разработка такого инструмента и его интеграция в системы мониторинга и управления сетью позволяют значительно повысить устойчивость и надежность IP-сетей. Это особенно важно для сетей, работающих на оборудовании

ОАО «Супертел», которое используется для обеспечения связи в критически важных инфраструктурах. Таким образом, предложенное программное обеспечение может стать ключевым элементом в стратегии защиты и восстановления сетей от кибератак.

Математическая модель и основные расчеты

Математическая модель, используемая в разработанном программном обеспечении, основана на анализе вероятностных характеристик работы сети в условиях кибератак. Основные параметры, которые учитываются в модели, включают [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]:

- **Среднее время восстановления после кибератаки (t_{AvRes}).** Этот параметр показывает, как быстро сеть способна вернуться к нормальному состоянию после того, как была подвергнута атаке.

- **Вероятность успешной реализации атак (P_{r1} и P_{r2}).** Эти параметры определяют, какова вероятность того, что атака определенного типа будет успешно проведена и нанесет ущерб сети.

- **Дисперсия времени реализации атак (DD_{r1} и DD_{r2}).** Эти параметры важны для понимания того, насколько варьируется время, необходимое для реализации атаки, что может влиять на стратегию защиты сети.

Описание разработанного программного обеспечения

Программное обеспечение, разработанное на основе данной модели, предназначено для проведения анализа и визуализации работы телефонной IP-сети в условиях кибератак. Оно было создано с использованием языка программирования Python, что обеспечивает гибкость и широкие возможности для его расширения и модификации в будущем.

Программа включает следующие основные модули:

1. *Модуль ввода данных.* Пользователь вводит основные параметры сети, такие как средняя скорость передачи данных (U), количество узлов на маршруте (N), общий объем памяти (K_{total}), а также параметры, связанные с атаками и восстановлением сети: интенсивность атак ($Y_{attack1}$, $Y_{attack2}$) и коэффициент восстановления сети (k).

2. *Модуль расчетов.* На основе введенных данных программа производит расчеты основных характеристик сети, используя предложенные в модели формулы. Программа рассчитывает такие параметры, как вероятность потери данных на маршруте, время доведения, интенсивность поступления, интенсивность обслуживания и другие.

3. *Модуль визуализации.* Программа строит графики и диаграммы, показывающие влияние кибератак на работу сети. Например, на графике может быть отображено изменение вероятности успешной атаки в зависимости от времени или количество потерянных пакетов данных в сети.

Пример использования программы можно рассмотреть на типичном сценарии атаки на сеть. Пусть, например, сеть подвергается атаке первого типа с вероятностью успешной реализации $P_{r1} = 0,5$, а также атаке второго типа с вероятностью $P_{r2} = 0,5$. При этом среднее время восстановления после атаки $t_{AvRes} = 5,6$ с, а среднее время реализации атак $t_{R1} = 300$ с и $t_{R2} = 400$ с соответственно. Вводя эти данные в программу, оператор может получить графическое отображение того, как изменяются ключевые параметры сети во времени, что позволяет понять, насколько критично воздействие каждой из атак и какие меры по восстановлению необходимо предпринять в первую очередь (рис. 1).

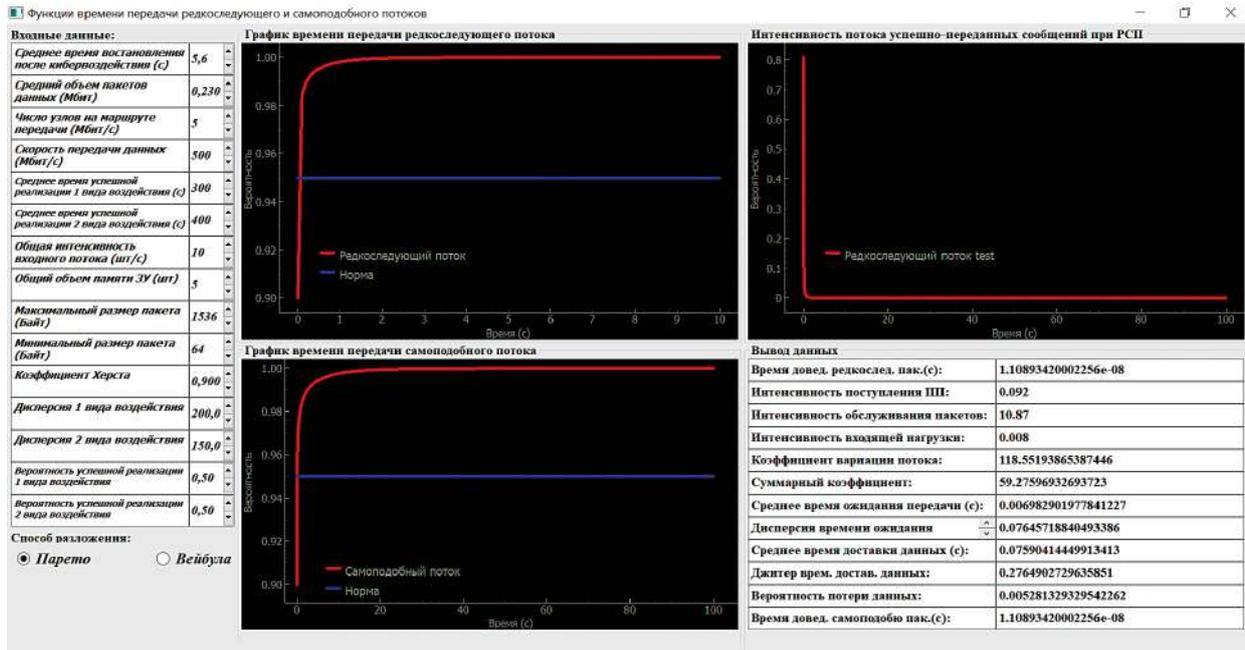


Рис. 1. Окно приложения, отображающее ключевые параметры телефонной IP-сети при воздействии на нее

Применение разработанного ПО

Программное обеспечение, описанное в данной статье, предназначено для применения в различных сценариях мониторинга и управления телефонными IP-сетями. Одним из ключевых его применений является тестирование устойчивости сетей в условиях имитации различных кибератак.

Сценарий 1. Тестирование сети в условиях DDoS-атаки

Представим, что сеть, работающая на оборудовании ОАО «Супертел», подвергается DDoS-атаке. В этом сценарии атака направлена на истощение ресурсов сети путем отправки большого объема трафика. Используя разработанное ПО, оператор может ввести параметры атаки, такие как интенсивность трафика и вероятность успешной реализации атаки, и увидеть, как изменяются ключевые показатели сети — задержка, потери пакетов и вероятность восстановления.

Программа позволяет визуализировать изменение этих параметров во времени, что дает оператору возможность оценить, насколько критично воздействие атаки и каковы возможности сети по восстановлению.

Сценарий 2. Анализ устойчивости сети к комплексным атакам

В данном сценарии сеть подвергается одновременно нескольким видам атак — DDoS и атаке на доступность сервисов. Программа позволяет учитывать влияние каждой атаки отдельно, а также анализировать их совокупное воздействие на сеть. Это особенно важно для сетей, которые обслуживают критически важные объекты, где даже небольшие сбои могут привести к серьезным последствиям.

Оператор может использовать ПО для определения слабых мест в сети и разработки стратегии защиты, включая установку дополнительных узлов или изменение маршрутизации трафика.

Сценарий 3. Оптимизация восстановления сети

В этом сценарии программа используется для анализа эффективности различных стратегий восстановления сети после атаки. Например, можно сравнить, как изменяется время восстановления в зависимости от увеличения ресурсов на восстановление или применения различных методов защиты.

Программа предоставляет визуализацию этих изменений, что позволяет операторам принимать обоснованные решения и выбирать наиболее эффективные стратегии восстановления.

Влияние на телекоммуникационные системы и оборудование

Программное обеспечение, описанное в данной статье, имеет большое значение для телекоммуникационных систем, работающих на оборудовании ОАО «Супертел». Использование этой программы позволяет операторам таких систем не только оценивать текущее состояние сети, но и прогнозировать возможные проблемы, что особенно важно в условиях увеличивающегося числа кибератак.

Например, в системах, обслуживающих крупные предприятия или государственные организации, использование этого ПО позволит значительно снизить риски, связанные с потерей данных или отказом системы в результате атаки. Визуализация работы сети в условиях атак дает возможность не только оперативно реагировать на инциденты, но и разрабатывать превентивные меры, повышающие общую устойчивость сети.

Заключение

Разработка программного обеспечения для визуализации работы телефонной IP-сети в условиях кибератак представляет собой важный шаг в обеспечении устойчивости и надежности современных телекоммуникационных

систем. Используя математическую модель, описанную в статье Evaluating the Functioning Quality of Data Transmission Networks in the Context of Cyberattacks, данное ПО позволяет наглядно представить последствия различных видов атак и принять меры по их предотвращению.

Для сетей, построенных на оборудовании ОАО «Супертел», использование этого ПО особенно актуально, так как оно позволяет повысить надежность и устойчивость сети, минимизировать риски и обеспечить бесперебойную работу в условиях увеличивающегося числа киберугроз.

Дальнейшее развитие данной программы может включать в себя расширение функционала для учета новых типов атак, интеграцию с системами автоматического мониторинга и управления сетью, а также разработку методов прогнозирования атак на основе машинного обучения.

Библиографический список

1. Шелухин О.И. Причины самоподобия телетрафика и методы оценки показателя Херста // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2007. Т. 3. № 1. С. 5–14.
2. Математическая GERT-модель технологии передачи метаданных в облачные антивирусные системы / В. В. Босько [и др.] // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. Харьков: ХУПС, 2014. Вып. 1(117). С. 137–141.
3. Привалов А.А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем связи ВМФ. СПб.: ВМА, 2000. 166 с.
4. Привалов А.А., Куделя В.Н. Методы математического моделирования систем и процессов связи. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 368 с.
5. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования

узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. 2-е изд., доп. и перераб. Красноярск: Поликом, 2011. 491 с.

6. Кучерявый А.Е., Цуприков А.Л. Сети связи следующего поколения. М.: ФГУП ЦНИИС, 2006. 278 с.

7. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы исследования процессов функционирования узлов коммутации сетей связи следующего поколения при произвольных распределениях поступления и обслуживания заявок различных классов качества // Телекоммуникации и транспорт. 2012. № 7. С. 135–140.

8. Структура транспортной сети связи ОАО «РЖД» и возникновение фазового перехода / А.О. Кравцов [и др.] // ELTRANS 10.0 (Элтранс-2019): материалы X Международного симпозиума «Элтранс-2019» (Eltrans-2019), посвященного 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России — Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, 9–11 октября 2019 года). СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. С. 190–196. EDN VYEFGL

9. Привалов А.А., Титов Д.Д. Метод оценки качества функционирования IP-сетей при передаче приоритетного многопродуктового потока данных в условиях кибератак // Материалы межвузовской научно-практической конференции «Современное состояние безопасности на транспорте и перспективы ее совершенствования» (Санкт-Петербург, Петергоф, 20 апреля 2022 года). СПб.: Военный институт (инженерно-технический), 2022. С. 72–86. EDN GNPBCV

10. Привалов А.А., Титов Д.Д. Модель процесса работы узла коммутации технологической IP-сети при обслуживании приоритетного многопродуктового потока в условиях DDOS-атак нарушителя // Фундаментальные и прикладные научные исследования: сборник трудов по материалам X Международного конкурса научно-исследовательских работ

(Уфа, 5 декабря 2022 года). Уфа: Вестник науки, 2022. С. 92–104. EDN JUCSGZ

11. Привалов А.А., Титов Д.Д. Модель процесса передачи приоритетного многопродуктового потока по каналу телефонной IP-сети в условиях компьютерных атак нарушителя // Инновационные научные исследования в современном мире: сборник трудов по материалам X Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ (Уфа, 28 ноября 2022 года). Ч. 1. Уфа: Вестник науки, 2022. С. 63–73. EDN DYCEIY

12. Привалов А.А., Лукичева В.Л., Титов Д.Д. Модель процесса функционирования узла коммутации технологической сети передачи данных в условиях DDOS атак нарушителя // Информация и космос. 2021. № 2. С. 66–75. EDN FQPOKK

13. Привалов А.А., Лукичева В.Л., Титов Д.Д. Модель процесса доставки пакетов по каналу передачи данных в условиях компьютерных атак нарушителя // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, № 2. С. 229–241. DOI 10.20295/1815-588X-2021-2-229-241. EDN UAZOYV

14. Evaluating the functioning quality of data transmission networks in the context of cyberattacks / A. Privalov [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14. No. 16. DOI 10.3390/en14164755. EDN FKDDCC

Дата поступления: 13.09.2024

Решение о публикации: 21.11.2024

Контактная информация:

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич — докт. воен.

наук, профессор; arprivalov@inbox.ru

ТИТОВ Даниил Дмитриевич — аспирант;

titovdd178@gmail.com

ТОЛСТИХИН Александр Игоревич —

al.tolstikhin@gmail.com

Program of visualisation of results of evaluation and analysis of IP-network functioning quality under the influence of cyber-attacks

A. A. Privalov³, D. D. Titov^{1,2}, A. I. Tolstikhin²

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

² Supertel OJSC, 38A, Petrogradskaya Naberezhnaya, Saint Petersburg, 197101, Russia

³ Academy of National Guard Troops, 1, Letchika Pilyutova st., Saint Petersburg, 198206, Russia

For citation: Privalov A. A., Titov D. D., Tolstikhin A. I. Program of visualisation of the results of evaluation and analysis of the IP-network functioning quality under the influence of cyberattacks. // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 973–980. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-973-980

Abstract

Purpose: the purpose of this paper is to develop software that is able to visualise the operation of an IP telephone network under cyberattacks using the mathematical model proposed in the research paper. The software should provide an in-depth analysis of the impact of attacks on network performance, as well as provide results in an easy to interpret graphical form. **Methods:** mathematical analysis and counting analysis methods were used to achieve the objectives. The basic mathematical models include equations to calculate impact distribution, restoration time and other network parameters. The programme applies numerical integration and differentiation to calculate the service time distribution. The distribution models include exponential, impulse and gamma distributions. Poisson, Weibull and Pareto distributions were used as distribution functions for random data flow parameters. **Results:** the software is able to simulate different cyberattack scenarios and their impact on key network metrics, analysing characteristics such as delivery time, packet loss probability and network resilience. The results of the analysis show how different types of impacts and recovery parameters affect network performance, allowing the operator to evaluate the effectiveness of different protection and damage techniques. **Practical innovativeness:** the results obtained in the course of technological modelling can be used to improve the stability and reliability of telecommunication systems, especially those operating on Supertel equipment. The software provides operators with a tool to analyse network conditions, develop preventive measures and optimise post-impact recovery strategies. It can also be integrated into a decision support system and used to identify cases of unauthorised access.

Keywords: cyberattack, IP-network, mathematical modelling, distribution functions, counting integration of network resilience, Supertel equipment

References

1. Sheluhin O. I. Prichiny samopodobiya teletrafika i metody ocenki pokazatelya Hersta // Elektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2007. T. 3. No. 1. S. 5–14. (In Russian)
2. Matematicheskaya GERT-model' tekhnologii peredachi metadannyh v oblachnyye antivirusnyye sistemy / V. V. Bos'ko [i dr.] // Sistemi obrobki informacii: zbirnik naukovih prac'. Har'kov: HUPS, 2014. Vyp. 1(117). S. 137–141. (In Russian)
3. Privalov A. A. Metod topologicheskogo preobrazovaniya stohasticheskikh setej i ego ispol'zovanie dlya analiza sistem svyazi VMF. SPb.: VMA, 2000. 166 s. (In Russian)
4. Privalov A.A., Kudelya V.N. Metody matematicheskogo modelirovaniya sistem i processov svyazi. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. 368 s. (In Russian)
5. Nazarov A.N., Sychev K.I. Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh

parametrov setej svyazi sleduyushchego pokoleniya. 2-e izd., dop. i pererab. Krasnoyarsk: Polikom, 2011. 491 s. (In Russian)

6. Kucheryavyj A.E., Cuprikov A.L. Seti svyazi sleduyushchego pokoleniya. M.: FGUP CNIIS, 2006. 278 s. (In Russian)

7. Nazarov A.N., Sychev K.I. Modeli i metody issledovaniya processov funkcionirovaniya uzlov kommutacii setej svyazi sleduyushchego pokoleniya pri proizvol'nyh raspredeleniyah postupleniya i obsluzhivaniya zayavok razlichnyh klassov kachestva // Telekommunikacii i transport. 2012. No. 7. S. 135–140. (In Russian)

8. Struktura transportnoj seti svyazi OAO “RZHD” i vozniknovenie fazovogo perekhoda / A.O. Kravcov [i dr.] // ELTRANS 10.0 (Eltrans-2019): materialy X Mezhdunarodnogo simpoziuma “Eltrans-2019” (Eltrans-2019), posvyashchennogo 210-letiyu so dnya osnovaniya pervogo transportnogo vuzza Rossii — Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I (Sankt-Peterburg, 9–11 oktyabrya 2019 goda). SPb.: IPK “NP-Print”, 2023. S. 190–196. EDN VYEFGL (In Russian)

9. Privalov A.A., Titov D.D. Metod ocenki kachestva funkcionirovaniya IP-setej pri peredachi prioritetnogo mnogoproduktovogo potoka dannyh v usloviyah kiberatak // Materialy mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Sovremennoe sostoyanie bezopasnosti na transporte i perspektivy ee sovershenstvovaniya” (Sankt-Peterburg, Petergof, 20 aprelya 2022 goda). SPb.: Voennyj institut (inzhenerno-tehnicheskij), 2022. S. 72–86. EDN GNPBCV (In Russian)

10. Privalov A.A., Titov D.D. Model' processa raboty uzla kommutacii tekhnologicheskoy IP-seti pri obsluzhivanii prioritetnogo mnogoproduktovogo potoka v usloviyah DDOS-atak narushitelya // Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: sbornik trudov po

materialam X Mezhdunarodnogo konkursa nauchno-issledovatel'skih rabot (Ufa, 5 dekabrya 2022 goda). Ufa: Vestnik nauki, 2022. S. 92–104. EDN JUCSGZ (In Russian)

11. Privalov A.A., Titov D.D. Model' processa peredachi prioritetnogo mnogoproduktovogo potoka po kanalu telefonnoj IP-seti v usloviyah komp'yuternyh atak narushitelya // Innovacionnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire: sbornik trudov po materialam X Vserossijskogo konkursa nauchno-issledovatel'skih rabot (Ufa, 28 noyabrya 2022 goda). Ch. 1. Ufa: Vestnik nauki, 2022. S. 63–73. EDN DYCEIY (In Russian)

12. Privalov A.A., Lukicheva V.L., Titov D.D. Model' processa funkcionirovaniya uzla kommutacii tekhnologicheskoy seti peredachi dannyh v usloviyah DDOS atak narushitelya // Informaciya i kosmos. 2021. No. 2. S. 66–75. EDN FQPOKK (In Russian)

13. Privalov A.A., Lukicheva V.L., Titov D.D. Model' processa dostavki paketov po kanalu peredachi dannyh v usloviyah komp'yuternyh atak narushitelya // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. T. 18, no. 2. S. 229–241. DOI 10.20295/1815-588X-2021-2-229-241. EDN UAZOYV (In Russian)

14. Evaluating the functioning quality of data transmission networks in the context of cyberattacks / A. Privalov [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14. No. 16. DOI 10.3390/en14164755. EDN FKDDCC

Received: 13.09.2024

Accepted: 21.11.2024

Author's information:

Andrey A. PRIVALOV — Dr. Sci. in Military;
Professor; aprivalov@inbox.ru

Daniil D. TITOV — Postgraduate Student;
titovdd178@gmail.com

Alexander I. TOLSTIKHIN —
al.tolstikhin@gmail.com

УДК 621.391.1

Моделирование процесса привязки локальной шкалы времени через узлы оптической транспортной сети

Ф. А. Прошин

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

Для цитирования: Прошин Ф. А. Моделирование процесса привязки локальной шкалы времени через узлы оптической транспортной сети. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 981–992. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-981-992

Аннотация

Цель: разработать имитационную модель процесса привязки локальной шкалы времени на узле телекоммуникационной сети с использованием протокола точного времени (Precision Time Protocol, PTP) при передаче пакетов через узлы оптической транспортной сети (Optical Transport Network, OTN). Сформировать последовательность этапов периодической подстройки локального источника времени с учетом дрейфа локальных часов. Получить вероятностно-временные характеристики процесса привязки и оценить достигаемую точность привязки. Сформулировать предложения по повышению точности с учетом выявленных характеристик и путем использования более эффективных механизмов передачи сигналов синхронизации. **Методы:** сравнение действующих и перспективных механизмов передачи сигналов синхронизации на уровне OTN на основании нормативной документации, анализ технической документации и экспериментальных данных с целью формирования исходных данных для моделирования, имитационное моделирование с использованием мультиагентного подхода. **Результаты:** разработана имитационная модель процесса привязки локальной шкалы времени с периодической подстройкой локальных часов при наличии дрейфа. Получены вероятностно-временные характеристики процесса передачи сообщений синхронизации и определены составляющие, влияющие на достигаемую точность привязки локальной шкалы времени. Сформулированы рекомендации по повышению точности привязки. **Практическая значимость:** результаты моделирования могут быть использованы при проектировании транспортных сетей на базе OTN, а также на этапе перевода действующих транспортных сетей на оборудование технологии OTN с целью обеспечения сетевой синхронизации на присоединяемых участках и совместного их функционирования. Также полученные вероятностно-временные характеристики могут быть использованы при моделировании сети сложной топологии, состоящей из множества узлов OTN.

Ключевые слова: сетевая синхронизация, частотно-временное обеспечение, OTN, привязка локальной шкалы времени, PTP, дрейф часов

Введение

Современные сети представляют собой сложные гетерогенные структуры, объединяющие различные технологии передачи, которым необходима синхронизация. Надежное функционирование телекоммуникационной сети может быть обеспечено при наличии стабильной и качественной синхронизации. Значительная

часть транспортных сетей функционирует на основе синхронной цифровой иерархии (СЦИ) и технологий пакетной передачи, которые заметно расширяют свои возможности, начиная вытеснять системы СЦИ с транспортного уровня, требуя применять методы синхронизации (точнее — привязки) шкалы времени.

Совместное функционирование данных технологий и внедрение технологии OTN как наиболее перспективной транспортной основы требуют анализа условий их совместного использования в отношении применяемых механизмов синхронизации. Выступая связующим элементом на уровне транспорта, OTN должна участвовать в процессах передачи и обработки сигналов синхронизации, а функциональность оборудования в отношении синхронизации при этом определяется условиями и составом сети.

Подходы в отношении синхронизации OTN

Одним из основных достоинств технологии OTN можно назвать возможность интеграции с существующими сетями, использующими протоколы обмена пакетными данными или принципы коммутации каналов. Перечень стандартизованных механизмов работы с нагрузкой различных типов можно найти в [1]. Взаимодействие OTN и присоединяемого участка сети требует согласованной передачи информации о синхронизации, которая используется с каждой стороны.

Передача сигналов тактовой сетевой синхронизации для традиционных сетей СЦИ обеспечивается благодаря прозрачности размещения нагрузки с допустимым уровнем джиттера [2], который может вноситься оборудованием OTN. При взаимодействии с пакетными сетями, которые строятся на основе IP-маршрутизаторов и Ethernet-коммутаторов, синхронизация выполняется на логическом уровне в зависимости от требований конечного потребителя, который может требовать частотной или фазовой (временной) синхронизации [3].

Реализация тактовой синхронизации на базе пакетных сетей возможна благодаря технологии «синхронного Ethernet» (Synchronous

Ethernet, SyncE), использование которой предполагает обязательную аппаратную поддержку каждым из узлов сети. Но наличие синхронизации по частоте не обеспечивает условий работы большинства современных сервисов, требующих привязки событий к временной шкале. Наиболее оптимальным решением можно считать применение данной технологии в сочетании с механизмами временной синхронизации [3].

Технология OTN, с одной стороны, служит «транспортом» для связи территориально распределенных участков сети, использующих одинаковую технологию передачи, и обеспечивает прозрачную доставку сигналов физического уровня, а с другой — оборудование OTN следует считать элементом системы частотно-временного обеспечения (ЧВО), участвующим в процессе передачи сообщений о времени.

Рассмотрим сценарий начального этапа включения уровня OTN в систему ЧВО в качестве транспортной технологии для предварительного анализа достигаемой точности при передаче сигналов единого времени (СЕВ). На рис. 1 приводится схема совместного функционирования устройств ЧВО и элементов OTN при топологии «точка — точка». Как видно из схемы, оборудование ЧВО использует уровень OTN в качестве транспорта, выступая для него нагрузкой, прозрачно передающейся в цифровой многоуровневой структуре согласно стандартизованным механизмам обработки пользовательских данных [1].

Несмотря на «прозрачность» OTN, ее элементы необходимо рассматривать как значимую составляющую при формировании цепей передачи сигналов единого времени. Последовательное преобразование служебной информации показано на рис. 2. При такой конфигурации (рис. 1) мультиплексор OTN не участвует в непосредственной обработке

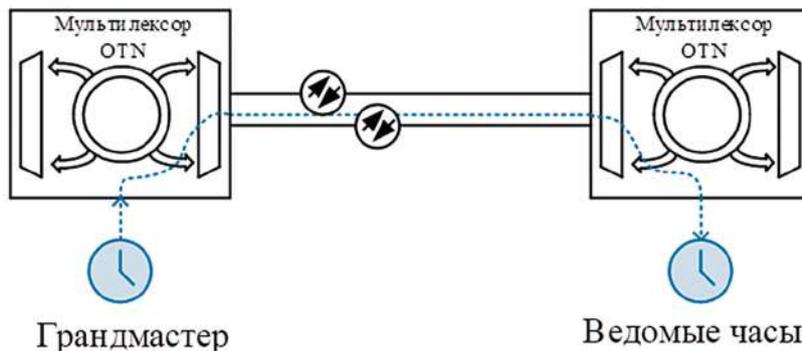


Рис. 1. Рассматриваемая схема взаимодействия устройств СЕВ

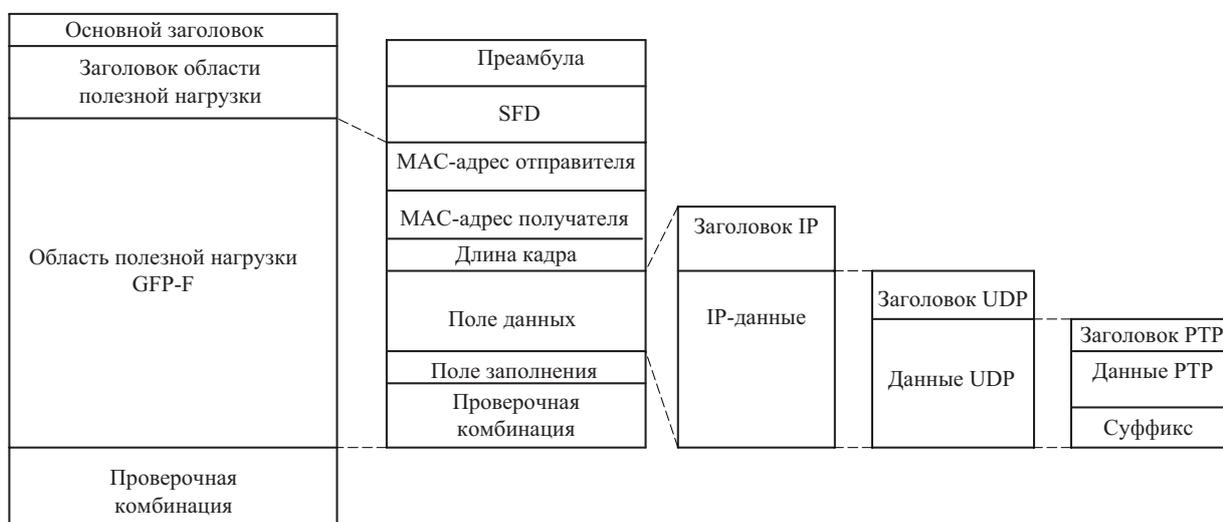


Рис. 2. Последовательное размещение сообщения RTP

информации о синхронизации, так как ему не предоставляется доступ к кадру Ethernet и, соответственно, сообщению RTP.

Постановка задачи

Предположим, что на ведущей стороне расположены обычные часы (Ordinary Clock, OC), выполняющие функцию грандмастера сети (домена), синхронизирующиеся от первичного источника шкалы и времени (Precision Reference Time Clock, PRTC) или от внешнего входа приемника сигналов ГНСС.

Рассмотрим использование стандартного профиля RTP [4] с использованием UDP. Сформированное ведущими часами сообщение RTP

размещается в структуре дейтаграммы UDP, которая далее последовательно размещается в пакете IP, выступающем нагрузкой для кадра Ethernet. На выходном интерфейсе часов сформированное сообщение, содержащее метку времени, представляет собой кадр Ethernet, на физическом уровне реализованный в соответствии с 1000BASE-T.

Мультиплексор OTN получает поток данных, содержащих метки времени, на пользовательский интерфейс 1 GbE. Далее в соответствии с [1] трафик Ethernet может быть передан по OTN путем размещения кадров Ethernet в структуре пакетов согласно общей процедуре формирования кадров в режиме их

отображения (Frame-Mapped Generic Framing Procedure, GFP-F), как указано в [5]. Для оптического блока уровня нагрузки (Optical Payload Unit, OPU) данный поток непрерывен, что достигается путем вставки заполняющих кадров GFP-F длиной 4 байта, и, следовательно, дополнительного выравнивания на уровне OTN не требуется. Далее OPU дополняется заголовками уровня оптического блока данных (Optical Data Unit, ODU) и оптического транспортного блока (Optical Transport Unit, OTU) и передается по сети до узла назначения, где производятся обратные описанному выше процессы для выделения на выходной интерфейс мультиплексора.

Потребитель синхронизации (ведомые часы), подсоединенный к порту мультиплексора, получает поток Ethernet-кадров и по-

следовательно выделяет сообщение RTP, содержащее метку времени. Процесс привязки локальной шкалы времени в соответствии с RTP приводится на рис. 3.

При реализации стандартного профиля IEEE 1588 используется двухшаговый механизм обмена, при котором используются вспомогательные сообщения «Follow_Up». Таким образом, ведомые часы после получения значений t_1, t_2, t_3, t_4 могут определить среднюю задержку передачи T_{cp} по формуле (1) и сдвиг локальной шкалы относительно ведущих часов $T_{сдв}$ по формуле (2):

$$T_{cp} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2}; \quad (1)$$

$$T_{сдв} = T_s - T_m - T_{cp} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_3 - t_4)}{2}. \quad (2)$$

Ведущие часы (Master)

Ведомые часы (Slave)

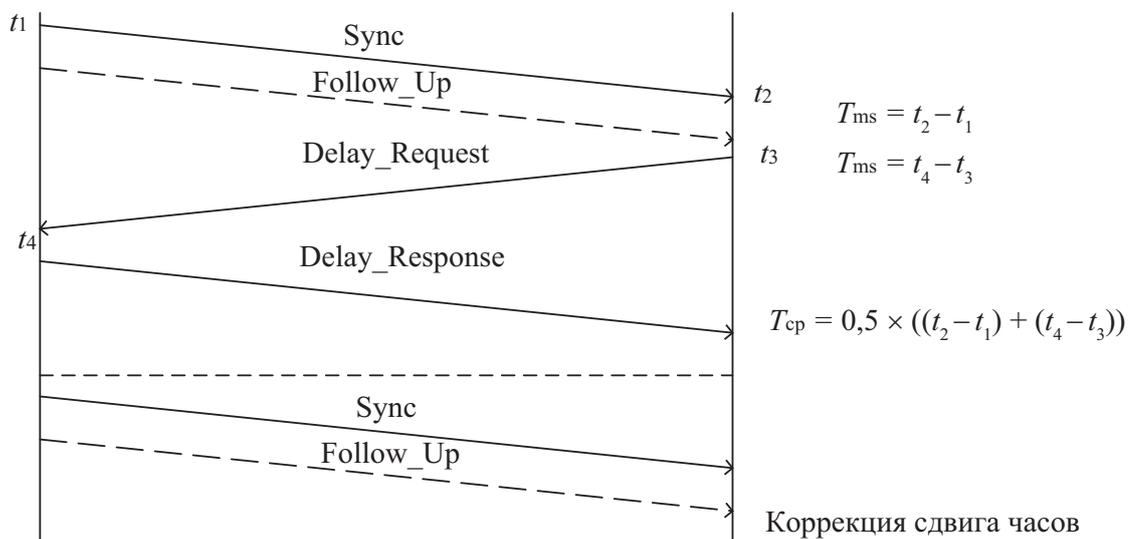


Рис. 3. Процесс привязки локальной шкалы времени ведомого устройства:

- t_1 — время отправки сообщения «Sync» ведущими часами;
- t_2 — время приема сообщения «Sync» ведомыми часами;
- t_3 — время отправки сообщения «Delay_Request» ведомыми часами;
- t_4 — время приема сообщения «Delay_Request» ведущими часами;
- T_{ms} — задержка передачи от ведущих к ведомым часам;
- T_{sm} — задержка передачи от ведомых к ведущим часам

Качество функционирования локальных часов определяется различными параметрами [6], относящимися к шкале времени и генератору. Наиболее простой для описания работы локальных часов принято считать модель, рассмотренную в [7, 8], согласно которой шкала времени смещена на постоянную величину ϕ относительно эталонной:

$$c_{\text{лок}}(t) = t + \phi, \quad (3)$$

где $c_{\text{лок}}(t)$ представляет вектор времени на локальных часах;

t — вектор времени на ведущих часах,

ϕ — сдвиг, начальная фаза локальных часов.

Но данная модель может применяться с учетом того, что в сети уже обеспечена синхронизация рассматриваемых узлов по частоте [9], то есть при одинаковой длительности временных интервалов время их начала смещено на одинаковую величину фазы ϕ . Если в сети не обеспечена частотная синхронизация, работа с моделью (3) может некорректно описывать ход локальных часов. Модель поведения часов с учетом дрейфа может быть записана в соответствии с формулой (4):

$$c_{\text{лок}}(t) = \alpha t + \phi, \quad (4)$$

где α — смещение частоты ведомых часов относительно ведущих, определяемое как отношение частот ведомых и ведущих часов.

Таким образом, функционирование локальных часов, учитывая наличие частотной синхронизации, описывается моделями, изображенными на рис. 4а, где сплошная линия показывает условие наличия предварительной подстройки, а пунктирная — характеризует дрейф из-за нестабильности частоты.

Описываемое плавное смещение локальной шкалы — не единственный фактор, определяющий точность синхронизации. Процесс подстройки шкалы времени должен выполняться непрерывно, без значительных скачков, иначе при сравнении меток времени может возникнуть ошибка, связанная со смещением шкалы на величину, большую, чем интервал времени между пакетами, содержащими метки времени (рис. 4б). При наличии постоянного дрейфа алгоритм подстройки с интервалом T подстраивает часы в соответствии с ведущими.

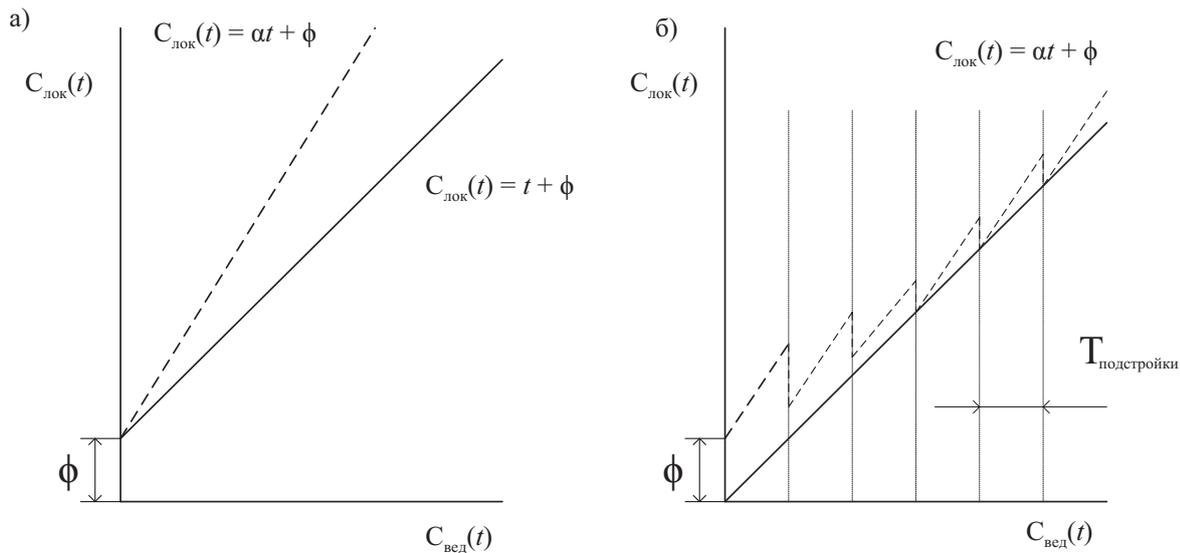


Рис. 4. Характер поведения локальных часов: а) при автономном режиме согласно формулам (3) и (4); б) при периодической подстройке с периодом $T_{\text{подстройки}}$

Описание исходных данных

Для моделирования выбран агентный подход, реализовать который позволяет среда имитационного моделирования AnyLogic. Агент в предлагаемой модели соответствует сообщению протокола точного времени, которое передает временную метку между ведущими часами и потребителем сигналов точного времени.

На рис. 5 приводится разработанная имитационная модель процесса привязки локальной шкалы времени на ведомом устройстве. Учитывая процессный подход, использована библиотека моделирования процессов AnyLogic. Под процессом в предлагаемой модели понимается этап обработки информационной единицы (сообщения RTP или другого протокола) в соответствии с описанным ранее алгоритмом.

Описание процессов и их вероятностно-временные характеристики приводятся в табл. 3. Значение задержки выбрано на ос-

новании анализа технической документации и опыта практической эксплуатации оборудования телекоммуникационных сетей [10–13], более подробное описание характеристик, связанных с работой мультиплексора, можно найти в [14].

При запуске модели предполагается, что роли ведущего и ведомого устройств заранее определены, при этом на локальных часах отсутствует привязка шкалы по времени и синхронизация по частоте, следовательно, поведение локальных часов описывается в соответствии с формулой (4). Величина начального сдвига ϕ генерируется в диапазоне от 50 до 150 мкс. Рассматриваются сценарии с использованием различных алгоритмов FEC:

- а) использование кода Рида-Соломона (Reed-Solomon, RS) с параметрами (1023, 1007);
- б) использование кода RS (255, 239).

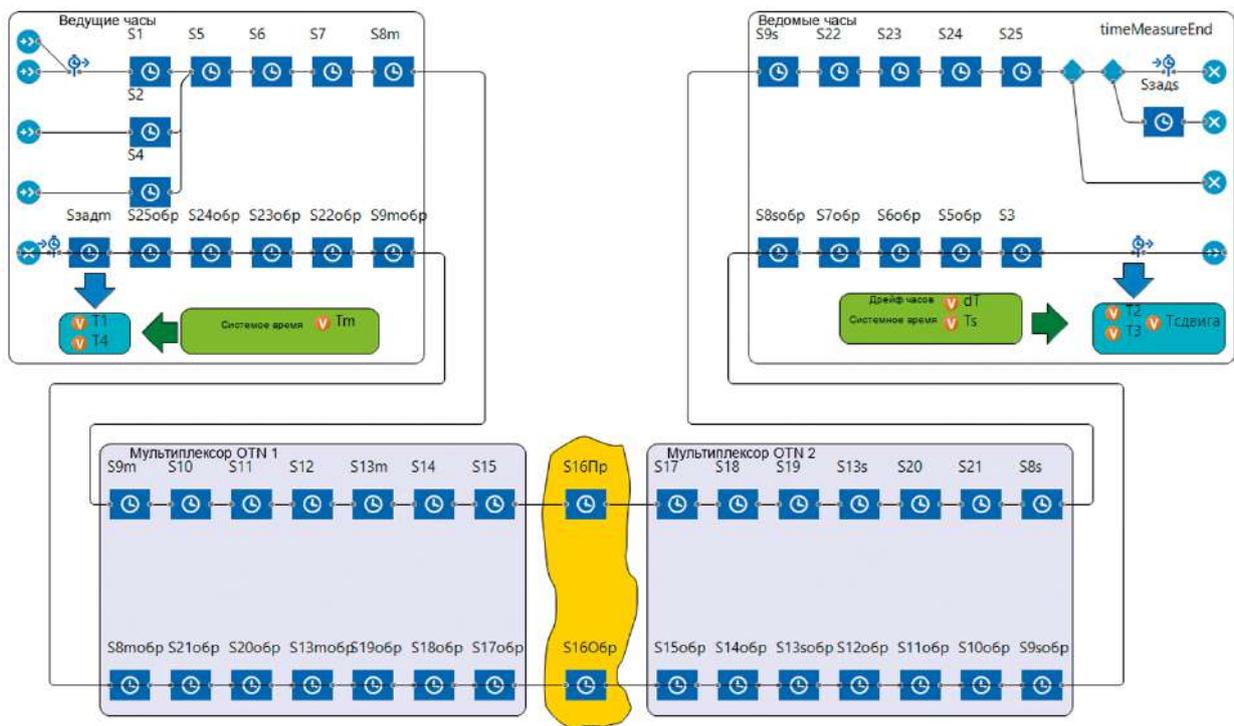


Рис. 5. Имитационная модель процесса привязки локальной шкалы времени

ТАБЛИЦА 3. Вероятностно-временные характеристики модели

Процесс	Обозначение на схеме	Значение, мкс
Формирование сообщения «Sync»	S1	0,12
Формирование сообщения «Follow_Up»	S2	0,12
Формирование сообщения «Delay_Request»	S3	0,12
Формирование сообщения «Delay_Response»	S4	0,12
Размещение сообщения в пакете UDP	S5	exponential (0; 1)
Размещение UDP в пакете IP	S6	1
Размещение IP в кадре Ethernet	S7	0,2
Преобразование Ethernet на выходном интерфейсе 1 GbE PHY	S8	uniform (0,12; 0,132)
Преобразование сигнала на входном интерфейсе 1 GbE PHY	S9	uniform (0,26; 0,292)
Размещение пакета Ethernet в GFP-F	S10	exponential (10; 0,1)
Размещение GFP-F в OPU	S11	5
Генерирование (мультиплексирование) ODU	S12	5
Коммутация ODU	S13	exponential (0,5; 2)
Генерирование OTU	S14	а) exponential (0,5; 1, 1) RS (255, 239) б) exponential (6, 7, 1) RS (1007, 1023)
Преобразование OTU в оптический сигнал на линейном выходе	S15	0,003
Задержка в оптическом волокне, 1 км	S16	5
Преобразование оптического сигнала в OTU на входном интерфейсе	S17	0,003
Обработка заголовка OTU с выделением ODU	S18	а) exponential (0,5, 1, 1) RS (255, 239); б) exponential (6, 7, 1) RS (1007, 1023)
Обработка заголовка ODU, демультимплексирование	S19	5
Обработка заголовка OPU, выделение GFP-F	S20	5
Выделение пакета Ethernet из GFP-F	S21	exponential (1; 0,1)
Выделение пакета IP из кадра Ethernet	S22	0,2
Выделение пакета UDP из пакета IP	S23	1
Выделение сообщения RTP из UDP	S24	exponential (10; 0,1)
Получение метки времени	S25	0,02
Задержка формирования ответного сообщения RTP	Sзад	0,01

Примечания: 1) *exponential* (λ , min) — экспоненциальный закон с параметром λ и минимальным значением min ; 2) *uniform* (a , b) — равномерный закон с параметрами $min = a$, $max = b$; 3) *exponential* (min , max , λ) — экспоненциальный закон с параметром λ , усеченный на отрезке $[min; max]$.

Различия во временных характеристиках данных кодов приводятся в табл. 3 и получены на основании анализа технических данных и практического опыта [12].

Результаты моделирования

Особенность реализации синхронизации на основе РТР заключается в чувствительности к асимметрии задержки, что сказывается на расчете среднего времени передачи и, соответственно, вносит погрешность в определение сдвига шкалы времени. На рис. 6а и 6б показаны гистограммы распределения задержек в прямом (T_{ms} , зеленый цвет) и обратном (T_{sm} , синий цвет) направлениях при использовании, соответственно, кодов RS (255, 239) и (1023, 1007).

На основании данных гистограмм в общем можно сделать вывод, что OTN характеризуется минимальной асимметрией. Для кода RS (255, 239) математическое ожидание составляет 87 мкс со среднеквадратическим отклонением порядка 3,3 мкс. По гистограмме видно, что распределение задержки носит одномодальный характер, но его форма не позволяет однозначно сделать вывод о законе, которым его можно задать.

Использование кода RS (1023, 1007) в отношении задержек позволяет получить схожие

результаты, но он дает большее математическое ожидание — 98 мкс со среднеквадратическим отклонением 3,9 мкс в прямом и 2,9 мкс в обратном направлении. Здесь также наблюдается явно выраженный одномодальный характер, при этом наблюдаются отдельные выбросы (110 мкс для T_{ms}), но частота их появления практически минимальна. При моделировании с использованием первого типа кода также присутствуют одиночные выбросы за пределами 100 мкс.

На рис. 7а и 7б приводятся графики, показывающие расхождение часов в процессе моделирования.

На начальном этапе часы находятся в состоянии рассогласования. Первый цикл обмена сообщениями позволяет скорректировать это расхождение, после чего процесс подстройки выполняется периодически. По результатам моделирования можно сказать, что точность привязки локальной шкалы времени достигается на уровне 10 мкс в течение всего периода наблюдения. Данные результаты согласуются с полученными характеристиками асимметрии, величина которой менее 1 мкс. Кроме того, на точность влияет дрейф локальных часов, дающий смещение при проставлении меток. Также реализация стандартного профиля РТР, рассматриваемого в данной

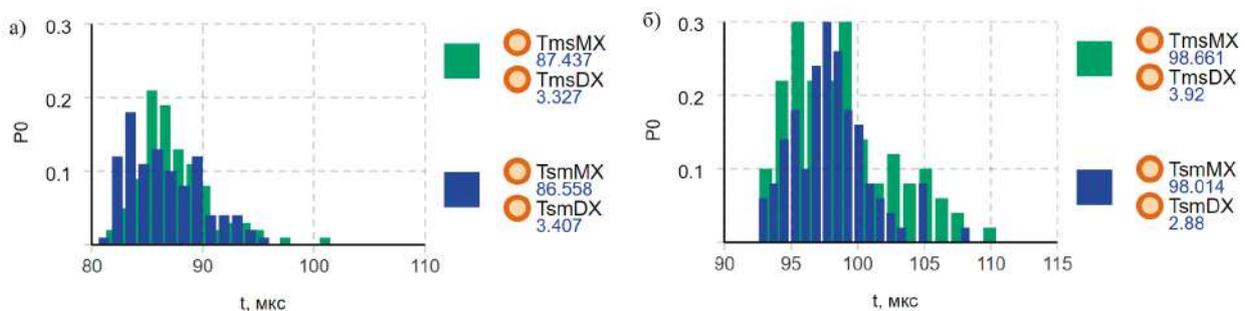


Рис. 6. Гистограммы распределения задержки при передаче с использованием кода:
а) FEC RS (255, 239); б) FEC RS (1023, 1007)

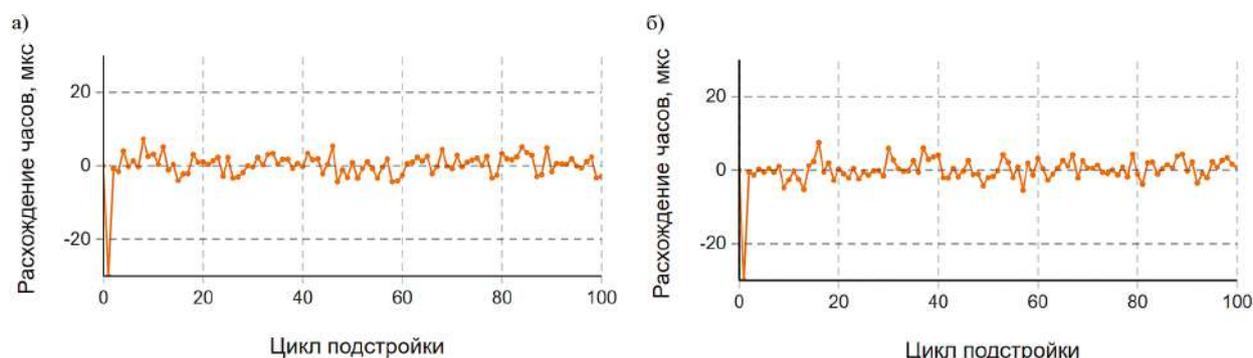


Рис. 7. Расхождение часов при использовании: а) RS (255, 239); б) RS (1023, 1007)

модели, предполагает использование протокола транспортного уровня UDP и последующую многоступенчатую обработку сообщений синхронизации. Так как часть протоколов реализуется на уровне программного обеспечения, вносятся задержки, связанные с возможностями операционной системы.

Заключение

На основании предложенной имитационной модели реализована возможность анализа отдельных процессов обработки сообщений синхронизации в процессе привязки локальной шкалы времени. По результатам моделирования показано, что OTN на начальном этапе включения в систему ЧВО позволяет без дополнительных аппаратных изменений достигать точности привязки локальной шкалы времени до единиц микросекунд, причем функциональность оборудования OTN не оказывает значительного влияния на точность привязки, в частности, при использовании различных алгоритмов упреждающего кодирования.

Предложенная модель позволяет анализировать точность реализации RTP при любых наборах исходных данных, учитывая периодичность подстройки, линейные скорости передачи, типы механизмов коррекции ошибок и другие параметры, влияющие на процесс в целом. Данный подход позволяет получить

оценку вероятностно-временных характеристик элементов устройств, что в дальнейшем позволяет перейти к моделированию взаимодействия устройств в составе сети.

Тем не менее полученная точность привязки отвечает далеко не всем современным сервисам, которые могут требовать точности до десятков наносекунд, но данные результаты позволяют определить комплекс мер, направленных на ее повышение. Прежде всего, необходимо включить узлы OTN в состав системы ЧВО. Это потребует конструктивных изменений оборудования с целью обеспечения доступа к сигналам синхронизации. Минимизация количества этапов обработки сообщений RTP позволит снизить возможные задержки, связанные с программной реализацией алгоритмов. На основании полученных результатов планируется дальнейшая работа, направленная на разработку и анализ более эффективных механизмов привязки локальной шкалы времени, а также влияния топологии сети на достигаемую точность подстройки.

Библиографический список

1. Interfaces for the optical transport network, Rec. ITU-T G.709/Y.1331 Amd. 3. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
2. The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN), Rec. ITU-T G.8251.

International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Nov. 2022.

3. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия — Телеком, 2018. 270 с.

4. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems amendment 1: Precision time protocol (PTP) mapping for transport over the optical transport network (OTN). IEEE standard 1588b-2022, 2022.

5. Generic framing procedure, Rec. ITU-T G.7041/Y.1303 Amd. 1. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.

6. An enhanced time synchronization method for a network based on Kalman filtering / Q. Li [et al.] // Sci Rep. 2024. № 14. Art no. 21271. DOI: 10.1038/s41598-024-71929-8

7. Minimax optimum estimators for phase synchronization in IEEE 1588 / A. Guruswamy [et al.]. IEEE Transactions on Communications. Vol. 63. № 9. P. 3350–3362. DOI: 10.1561/2000000108

8. Karthik A. K., Blum R. S. Recent advances in Clock synchronization for packet-switched networks // Foundations and trends in signal processing. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 360–443. DOI: 10.1561/2000000108

9. White paper: Timestamping and clock Synchronization in P4-Programmable Platforms / T. Martinek [et al.] // GEANT. 2022. URL: <https://resources.geant.org/wp-content/uploads/2022/09/>

GN4-3_White-Paper_Timestamping-and-Clock-Synchronisation-in-P4-Programmable-Platforms.pdf

10. Салифов И. И. Методика оценки сквозной задержки на оптической магистральной сети со сложной архитектурой: дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2012. 253 с.

11. Богданова Е. Г. Оптическая маршрутизация в транспортной сети IMT-2020/5G // Первая миля. 2020. № 1. С. 62–70.

12. Хмелев К. Ф. Основы фотонного транспорта. Киев: Техника, 2008. 680 с.

13. WDM/OTN Latency, Shenzhen, China, Huawei. URL: https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/43_latency.html

14. Моделирование процесса обработки пакетов времени на устройствах транспортной сети / А. К. Канаев [и др.] // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 34–47. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47

15. Huang Y., Mehrotra S., Li J. A hybrid FEC-ARQ protocol for low-delay lossless sequential data streaming // Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo ICME 2009. P. 718–725.

Дата поступления: 25.09.2024

Решение о публикации: 25.11.2024

Контактная информация:

ПРОШИН Федор Алексеевич — ассистент кафедры «Электрическая связь»; fedorproshin@gmail.com

Modeling of local time scale synchronization through optical transport network nodes

F. A. Proshin

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

For citation: Proshin F. A. Modeling of local time scale synchronization through optical transport network nodes. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 981–992. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-981-992

Abstract

Purpose: to develop a simulation model of local time scale synchronization at telecommunication network node by using precision time protocol (PTP) assuming that packets are transmitting through optical transport network (OTN). To form a sequence of stages for periodical local clock correction taking into account the local clock drift. To get probabilistic-temporal parameters of this process for evaluating the achievable accuracy. To formulate suggestions for improving the accuracy in view of received parameters and by using more effective mechanisms of synchronization signal transmitting. **Methods:** comparison of current and perspective mechanisms of synchronization signal transmitting through OTN layer that can be founded in standards, analyzing of technical documentation and experimental data for generating initial data using in model, simulation modeling with the point of view multi-agent method. **Results:** the simulation model of local time scale synchronization with the periodical drift correction is developed. The probabilistic-temporal parameters of synchronization message transmitting are received and elements that influence achievable accuracy are obtained. A number of recommendations for its improving is formulated. **Practical importance:** the simulation results can be implemented for designing transport networks based on OTN and for upgrading current transport networks in a way of implementing OTN with the point of view to provide network synchronization for each attached network and to work correctly with the synchronization information. Also received probabilistic-temporal parameters can be used for modeling at network layer taking into account more complex OTN topologies.

Keywords: network synchronization, frequency-time provision, OTN, local time scale synchronization, PTP, clock drift

References

1. Interfaces for the optical transport network, Rec. ITU-T G.709/Y.1331 Amd. 3. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
2. The control of jitter and wander within the optical transport network (OTN), Rec. ITU-T G.8251. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Nov. 2022.
3. Ryzhkov A.V. Chastotno-vremennoe obespechenie v setyah elektrosvyazi: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2018. 270 s. (In Russian)
4. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems amendment 1: Precision time protocol (PTP) mapping for transport over the optical transport network (OTN). IEEE Standard 1588b-2022, 2022.
5. Generic framing procedure, Rec. ITU-T G.7041/Y.1303 Amd. 1. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
6. An enhanced time synchronization method for a network based on Kalman filtering / Q. Li [et al] // Sci Rep. 2024. № 14. Art no. 21271. DOI: 10.1038/s41598-024-71929-8
7. Minimax optimum estimators for phase synchronization in IEEE 1588 / A. Guruswamy [et al]. IEEE Transactions on Communications. Vol. 63. № 9. P. 3350–3362. DOI: 10.1561/2000000108

8. Karthik A. K., Blum R. S. Recent advances in clock synchronization for packet-switched networks // Foundations and trends in signal processing. 2020. Vol. 13, No. 4. P. 360–443. DOI: 10.1561/2000000108
9. White paper: Timestamping and clock Synchronization in P4-Programmable Platforms / T. Martinek [et al.] // GEANT. 2022. URL: https://resources.geant.org/wp-content/uploads/2022/09/GN4-3_White-Paper_Timestamping-and-Clock-Synchronisation-in-P4-Programmable-Platforms.pdf
10. Salifov I.I. Metodika ocenki skvoznoj zaderzhki na opticheskoj magistral'noj seti so slozhnoj arhitekturoj: diss. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2012. 253 s. (In Russian)
11. Bogdanova E. G. Opticheskaya marshrutizaciya v transportnoj seti IMT-2020/5G // Pervaya milya. 2020. No. 1. S. 62–70. (In Russian)
12. Hmelev K. F. Osnovy fotonogo transporta. Kiev: Tekhnika, 2008. 680 s. (In Russian)
13. WDM/OTN Latency, Shenzhen, China, Huawei. URL: https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/43_latency.html
14. Modelirovanie processa obrabotki me-tok vremeni na ustrojstvah transportnoj seti / A.K. Kanaev [i dr.] // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2024. T. 10. No. 2. S. 34–47. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-34-47 (In Russian)
15. Huang Y., Mehrotra S., Li J. A hybrid FEC-ARQ protocol for low-delay lossless sequential data streaming // Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo ICME 2009. P. 718–725.

Received: 25.09.2024

Accepted: 25.11.2024

Author's information:

Fedor A. PROSHIN — Assistant Professor
at the department of «Electrical communication»;
fedorproshin@gmail.com

Proceedings of Petersburg Transport University



Scientific edition
Published since 1884
Under the present name it is published since 2004
Issued 4 times a year

ISSN 1815-588X



9 771815 588007